



Vizualizace vstřikování paliva do sacího potrubí pro výzkum zážehových motorů

Diplomová práce

Studijní program: N2301 – Strojní inženýrství
Studijní obor: 2302T010 – Konstrukce strojů a zařízení
Autor práce: **Bc. Karel Čech**
Vedoucí práce: prof. Ing. Celestýn Scholz, Ph.D.





Videogram the manifold fuel injection for IC engines research.

Diploma thesis

Study programme: N2301 – Mechanical Engineering
Study branch: 2302T010 – Machine and Equipment Systems
Author: **Bc. Karel Čech**
Supervisor: prof. Ing. Celestýn Scholz, Ph.D.



ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

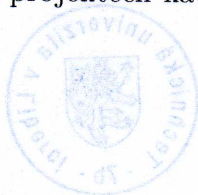
Jméno a příjmení: **Bc. Karel Čech**
Osobní číslo: **S14000323**
Studijní program: **N2301 Strojní inženýrství**
Studijní obor: **Konstrukce strojů a zařízení**
Název tématu: **Vizualizace vstřikování paliva do sacího potrubí pro výzkum zážehových motorů**
Zadávající katedra: **Katedra vozidel a motorů**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

Konstrukční a zkušební práce spojené s úpravou sacího potrubí k zavedení endoskopu, příprava a vlastní měření s vyhodnocením videí pro různé pracovní režimy a nastavení parametrů motoru. K experimentům bude využit již instalovaný motor na zkušebním stanovišti v laboratoři TUL a zařízení VisioScope AVL.

Doporučený postup:

1. Řešení problematiky vnější tvorby směsi zážehových spalovacích motorů (teorie, experimenty s vizualizací výstřiku paliva).
2. Konstrukce úpravy sacího potrubí k zavedení endoskopu s ohledem na zástavbové poměry motoru.
3. Příprava a vlastní měření na motoru instalovaném na stanovišti s dynamometrem Schenck 190.
4. Zhotovení videosnímků průniku vstřikovaného paliva do nasávaného vzduchu pro různé pracovní režimy motoru.
5. Cílem je vytvoření metodiky pro vyhodnocení kvality vnější tvorby směsi, u moderních zážehových motorů s víceventily, bez efektu wall wet "smáčení stěn". Předpokládá se částečné využití výsledků práce v budoucích projektech katedry vozidel a motorů TUL.



Rozsah grafických prací:

Rozsah pracovní zprávy: **50 stran**

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

1. SCHOLZ, Celestýn a Josef BLAŽEK. Vizualizace procesu spalování a vstřikování paliva, In: XXXIII. mezinárodní konference KOKA 2002. SPU Nitra. Ráčkova dolina 2002, pp.6. ISBN 80-8069-051-0.
2. BLAŽEK, Josef. Využití vizualizační techniky u zážehových motorů. In: XXXVIII.
3. Mezinárodní vědecká konference pracovníků kateder a pracovišť spalovacích motorů vysokých škol na Slovensku a v Čechách, KOKA'07, Slovenská technická univerzita v Bratislavě, Bratislava 2007. ISBN 978-80-227-2714-3.
4. SCHOLZ, Celestýn a Josef BLAŽEK. Úprava motoru Š-A pro vizualizaci vstřikování. Katedra strojů průmyslové dopravy, FS, TU v Liberci, Č. zprávy: SM 431/2002, Liberec, 2002.

Vedoucí diplomové práce:

prof. Ing. Celestýn Scholz, Ph.D.

Katedra vozidel a motorů

Datum zadání diplomové práce: **15. listopadu 2015**

Termín odevzdání diplomové práce: **15. února 2017**

prof. Dr. Ing. Petr Lenfeld
děkan



Ing. Robert Voženílek, Ph.D.
vedoucí katedry

V Liberci dne 15. listopadu 2015

Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li diplomovou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Diplomovou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé diplomové práce a konzultantem.

Současně čestně prohlašuji, že tištěná verze práce se shoduje s elektronickou verzí, vloženou do IS STAG.

Datum: 27.5.2016

Podpis:



Poděkování

Za pomoc, cenné připomínky a rady při zpracování diplomové práce tímto děkuji vedoucímu mé diplomové práce panu prof. Ing. Celestýnu Scholzovi, Ph.D. Za pomoc při měření a zpracování výsledků z měření děkuji panu Ing. Alešovi Dittrichovi. Dále bych chtěl poděkovat mé rodině za podporu při studiu.

Anotace

Tato diplomová práce se zabývá vizualizací vstřikování paliva do sacího potrubí pro výzkum zážehových motorů. V první části práce je provedena rešerše problematiky tvorby palivové směsi u zážehových motorů. Dále jsou uvedeny možnosti vizualizace dějů uvnitř spalovacích motorů. V další části práce jsou navrženy úpravy sacího potrubí pro zavedení endoskopu a popis vlastního měření. V závěru je provedeno vyhodnocení vizualizace a je navržena metoda pro zpracování výsledků měření.

Klíčová slova

vizualizace, vstřikování paliva, tvorba směsi, endoskop, sací potrubí

Annotation

This diploma thesis deals with videogram the manifold fuel injection for petrol engines research. In the first part is done background research about petrol engine fuel mixture creation. Farther there are listed possibilities of visualisation of precesses in IC engines. In the main part of thesis are proposed treatments of intake manifold for endoscope installation and description of measurement. In conclusion is done evaluation of visualisation and is proposed method for processing of measured results.

Keywords

visualisation, fuel injection, fuel mixture creation, endoscope, intake manifold

Obsah

Seznam zkratk a symbolů	7
1 Úvod.....	8
2 Tvorba směsi zážehových motorů	9
2.1 Palivová směs.....	9
2.2 Karburátor	10
2.2.1 Princip karburátoru	10
2.2.2 Pomocná zařízení karburátoru	11
2.3 Vstřikování paliva	13
2.3.1 Jednobodové vstřikování	14
2.3.2 Vícebodové vstřikování	16
2.3.3 Přímé vstřikování	19
3 Vizualizace dějů uvnitř spalovacího motoru	22
3.1 Transparentní motor	22
3.2 Endoskopická technika.....	24
3.2.1 Endoskop	25
3.2.2 Kamera.....	25
3.2.3 Příklad měření pomocí zařízení VisioScope.....	26
4 Konstrukční úpravy k zavedení endoskopu	27
4.1 Endoskop zavedený do sacího potrubí	27
4.2 Endoskop zavedený skrz stěnu hlavy válců	30
5 Měření.....	33
5.1 Měřicí zařízení	33
5.2 Průběh měření	34
5.3 Výstupy z měření	34
5.4 Měření č. 1	35
5.5 Měření č. 2	38
5.6 Měření č. 3	41
5.7 Měření č. 4	45
6 Vyhodnocení záznamů.....	48
6.1 Postprocesing	48
6.2 Kvantifikace neodpařeného paliva na snímcích.....	50
7 Závěr	53
8 Seznam použité literatury	54

Seznam zkratek a symbolů

λ	[-]	součinitel přebytku vzduchu
CCD		snímač obrazu používaný v digitálních fotoaparátech (Charge-coupled device)
CFI		centrální vstřikování (Central Fuel Injection)
CNG		stlačený zemní plyn (Compressed Natural Gas)
FSI		přímé vstřikování vrstvené směsi (Fuel Stratifield Injection)
GDI		přímé vstřikování benzínu (Gasoline Direkt Injection)
KH		kliková hřídel
MPI		vícebodové vstřikování do sacích kanálů (Multi-Point Injection)
M_t	[Nm]	točivý moment
n	[min ⁻¹]	otáčky
p	[Pa]	tlak
RPM	[min ⁻¹]	otáčky za minutu
SPI		jednobodové vstřikování (Single Point Injection)
T, t	[°C]	teplota
TFSI		přímé vstřikování paliva s přeplňováním turbodmychadlem (Turbocharger Fuel Stratifield Injection)
TSI		přímé vstřikování paliva s dvojitým přeplňováním/přeplňováním turbodmychadlem (Twincharger/Turbocharger Stratifield Injection)
VGA		standard pro počítačovou zobrazovací techniku (Video Graphics Array)

1 Úvod

Automobil je dopravní prostředek, bez kterého si v dnešní době naprostá většina z nás nedokáže svůj život představit. O tom vypovídá i neustále se zvyšující počet vozidel na našich silnicích.

Trendem poslední doby je prosazování dopravních prostředků s co možná nejnižší ekologickou zátěží vyplývající z jejich provozu, majoritní podíl mezi vyrobenými vozidly mají ovšem stále vozidla s pístovými spalovacími motory. A právě mezi těmito vozidly tvoří většinu automobily spalující benzin a naftu. Jedním z důvodů, proč je prováděn výzkum vstřikování paliva a tvorby palivové směsi, je snaha o co možná nejvyšší účinnost a nejnižší emise výfukových plynů spalovacích motorů. Tyto limity jsou zákonnými předpisy omezovány a neustále zpřísnovány.

Pro studium a optimalizaci dějů probíhajících ve spalovacích motorech se uplatňuje, podobně jako v jiných odvětvích, počítačová simulace, která díky rychlému nárůstu výpočetních výkonů počítačů umožňuje získat stále přesnější výsledky. I přesto jsou optické metody pro zobrazení děje v motoru pro výzkum velmi důležité, protože pomocí nich získáme záznam reálného stavu objektu ve sledovaném prostoru.

Tato práce se zabývá právě vizualizací vstřikování paliva do sacího potrubí zážehového motoru. V úvodu je v řešeršní části shrnuta problematika tvorby směsi zážehových motorů. Následuje popis úprav k zavedení endoskopu provedených na měřeném motoru a vlastní měření. Dále jsou prezentovány výsledky získané vizualizací vstřikování a v závěru je navržena metoda pro zpracování a hodnocení takto získaných snímků vstřikovaného paliva.

2 Tvorba směsi zážehových motorů

Palivový systém motoru přivádí palivo ve formě velmi malých kapiček do vzduchu. Přivedené palivo se musí po vstřiku, během plnění válce a kompresního zdvihu zcela odpařit a palivové páry se musí promísit se vzduchem a vytvořit homogenní směs. U zážehových motorů je pro zážeh a správné hoření důležité vytvoření buď homogenní směsi paliva se vzduchem, nebo směsi vrstvené, kdy je bohatost směsi optimální v prostoru u zapalovací svíčky.

2.1 Palivová směs

Složení směsi charakterizuje součinitel přebytku vzduchu λ . Obsahuje-li směs přebytek vzduchu, jedná se o chudou směs a součinitel přebytku vzduchu $\lambda > 1$. Tento případ se používá u plynových zážehových motorů. Pokud je ve směsi nedostatek vzduchu, jedná se o bohatou směs a součinitel $\lambda < 1$. Spalování takovéto směsi je energeticky méně výhodné. Dále dochází k nedokonalému spalování s vyšší produkcí škodlivin ve výfukových plynech. Pokud je součinitel přebytku vzduchu $\lambda = 1$, jedná se o stechiometrickou směs. S režimem $\lambda = 1$ pracuje většina dnešních vozidlových zážehových motorů. Realizace tohoto způsobu tvoření směsi (odměřování množství paliva a vzduchu) vyžaduje elektronicky řízený palivový systém se zpětnou vazbou (λ sonda na výstupu výfukových plynů z motoru) [5, 6].

U zážehových motorů s vnější tvorbou směsi se pro řízení výkonu používá změna množství nasávaného vzduchu. Potřebné množství vzduchu je omezováno natočením škrticí klapky. U zážehových motorů s vnitřní tvorbou směsi se pro řízení výkonu používá i dávkování vstřikovaného množství paliva. Přiváděnému množství vzduchu odpovídá přiváděné množství paliva. Podle provozních podmínek motoru se složení palivové směsi upravuje.

Při studeném startu motoru dochází k nedostatečnému smísení vzduchu s palivem. Palivo se vlivem nízké teploty hůře odpařuje a dochází k silnému smáčení stěn sacího potrubí i válce. Aby se snížila ztráta paliva kondenzací na stěnách, je v okamžiku startu a krátce po něm přivedeno přídatné palivo, dokud se nezvýší teplota tak, aby byla zajištěna dokonalejší příprava palivové směsi. Při zahřívání motoru je ještě připravovaná směs obohacována, protože část paliva stále kondenzuje na chladných stěnách sacího potrubí. Palivo usazené na stěnách sacího potrubí se odpaří při zahřátí potrubí na vyšší teplotu.

Při volnoběhu a částečném zatížení motor pracuje se stechiometrickou směsí. Pokud motor pracuje na plné zatížení, používá se bohatá směs, která umožní dosáhnout zvýšení točivého momentu vlivem zvětšení rychlosti hoření paliva. Dalším důvodem pro použití je snížení teploty výfukových plynů pro zabránění poškození katalyzátoru.

Během akcelerace a decelerace závisí odpařování paliva na tlaku v sacím potrubí. Vlivem otevření škrticí klapky při zrychlování se kvůli přírůstku tlaku mění vrstvička paliva na stěnách potrubí. Odpařivost paliva se zhorší a tloušťka palivového filmu na stěnách se zvětší. Tím se směs přiváděná do spalovacího prostoru krátkodobě ochudí, dokud se tloušťka filmu neustálí. Naopak při deceleraci se usazené palivo ze stěn odpařuje a směs se stává bohatší. Smáčení stěn palivem při chodu studeného motoru a při přechodových režimech se projevuje zvýšením obsahu škodlivin ve výfukových plynech [7].

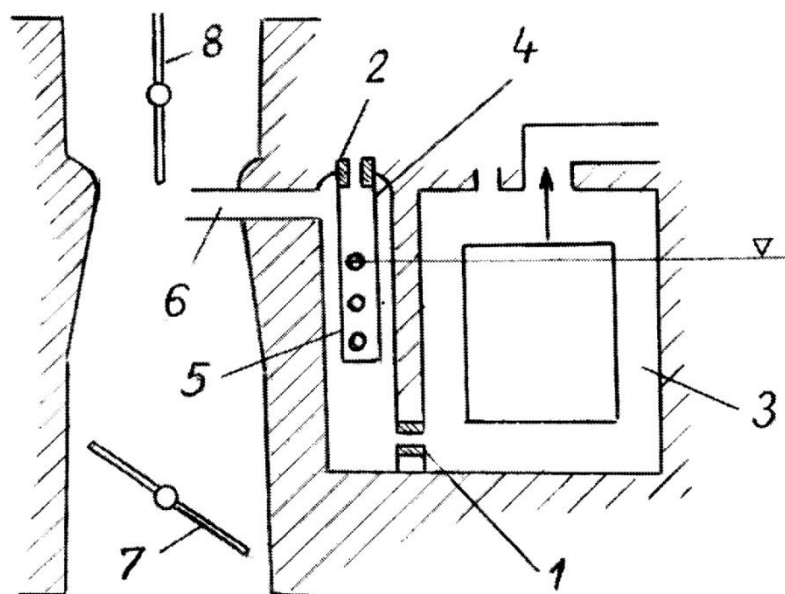
2.2 Karburátor

Přibližně do začátku osmdesátých let minulého století se pro přípravu palivové směsi u zážehových motorů využívaly výhradně karburátory. Historicky první typy byly odpařovací karburátory, u kterých při sacím zdvihu prostupoval vzduch vrstvou paliva a sytil se jeho parami. Takto vzniklá směs se ředila přidavným vzduchem pomocí ručně ovládaného šoupátka nebo klapkou. Tento způsob tvorby směsi byl značně nedokonalý. Klasický princip rozprašování paliva do proudícího vzduchu byl zaveden roku 1893. V tomto případě se palivo přivádí tryskou do zúženého místa v difuzoru a je rozprašováno do proudícího vzduchu. Množství směsi je řízeno klapkou za difuzorem. Na základě tohoto principu pracuje většina karburátorů, které byly postupně zdokonalovány. Ve vozidlech se používaly spádové karburátory, později se rozšířily i rovnotlaké typy.

2.2.1 Princip karburátoru

Vzduch nasávaný do motoru proudí přes směšovací komoru karburátoru. Ta je tvořena difuzorem, do kterého ústí rozprašovač. Aby se palivo dobře rozprášilo, musí proudící vzduch dosáhnout velké rychlosti. Ta vzniká zúžením průřezu náběžnou hranou difuzoru. Vytváří se zde podtlak proti barometrickému tlaku, působícímu na hladinu paliva v plovákové komoře. Palivo je do plovákové komory přiváděno čerpadlem z palivové nádrže. Stálou hladinu paliva v plovákové komoře udržuje jehlový ventil, který je ovládán pomocí plováku. U membránových karburátorů

nahrazuje funkci plovákové komory membránový regulátor. Množství paliva dodávaného do směsi je závislé na rychlosti proudění vzduchu v difuzoru. Přibližně stejné složení směsi i při rostoucí rychlosti vzduchu v difuzoru je udržováno pomocí korekčního vzduchu, jehož množství je závislé na průřezu otvoru vzdušníku. Palivo se v emulzní šachtě smísí s korekčním vzduchem a tato předběžná směs je poté vysávána kanálkem rozprašovače do difuzoru, kde vzniká konečná směs [7].



Obrázek 1: Schéma spádového karburátoru. 1 – hlavní tryska, 2 – vzdušník korekčního vzduchu, 3 – plováková komora, 4 – emulzní šachta, 5 – emulzní trubice, 6 – rozprašovač, 7 – škrticí klapka, 8 – spouštěcí přívěra [7]

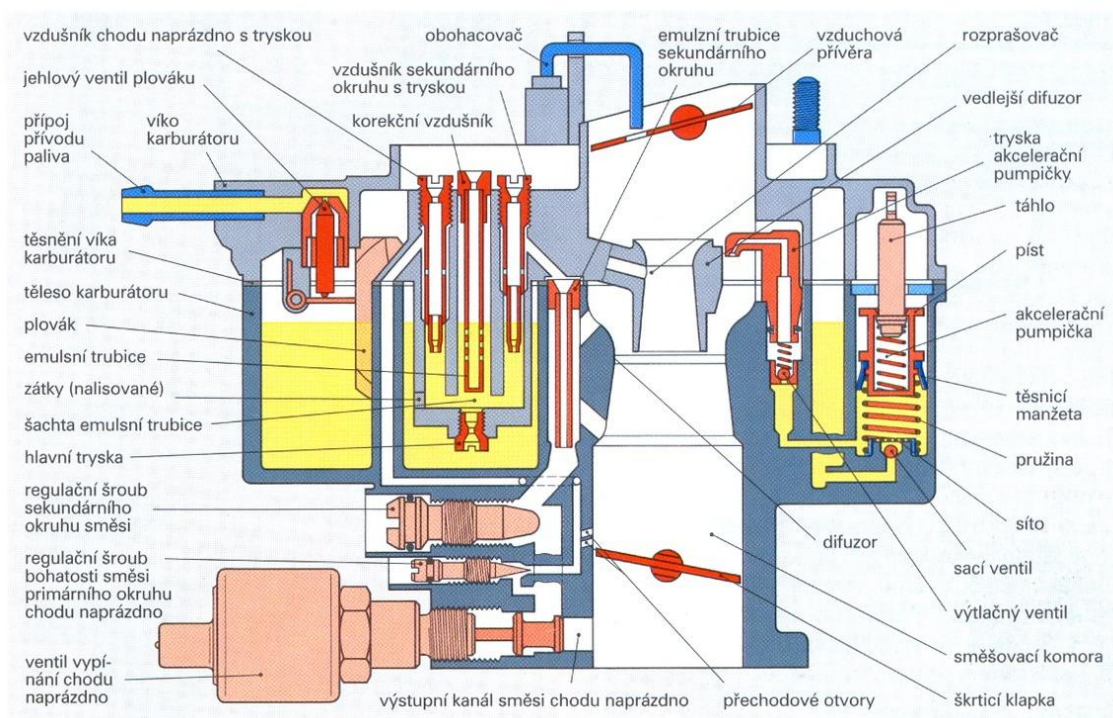
2.2.2 Pomocná zařízení karburátoru

Hlavní odměřovací systém karburátoru zajišťuje rovnoměrný a ekonomický chod motoru při ustálených podmínkách a středních zatíženích. Požadavky na bohatost směsi při volnoběhu, při spouštění motoru za nízkých teplot, při akceleraci a při požadavku na nejvyšší výkon však není schopen splnit. Pro tyto režimy jsou v karburátoru další pomocná zařízení.

Při spouštění studeného motoru se velká část paliva ze směsi sráží a tvoří kondenzát paliva, na všech studených částech motoru, kterými při sání prochází. O toto palivo je směs velmi ochuzována a do válce by se bez dodatečného obohacení palivem dostala jen velmi chudá směs, kterou by elektrická jiskra nebyla schopná zapálit. Také malá rychlost proudění při nízkých spouštěcích otáčkách nestačí k normální funkci volnoběžného a hlavního směšovacího systému. Systém sytiče proto musí směs obohatit tak, aby se i po kondenzaci paliva do oblasti zapalovací svíčky dostávala směs schopná

zapálení. Dodává proto směs až pětikrát bohatší ($\lambda = 0,2$) [8]. Jako startovacího systému se u karburátoru používá sytič nebo startovací přívěra. Sytič je v podstatě samostatný karburátor, nastavený na přípravu velmi bohaté směsi. Otevírání přívodního kanálku sytiče je řízeno šoupátkem, které je ovládáno buď mechanicky z místa řidiče, nebo automaticky pomocí bimetalové spirály. Druhý systém – startovací přívěra je klapka, která je umístěna ve vstupní části směšovací komory. Při jejím zavření vzniká v prostoru směšovací komory podtlak, díky kterému je z hlavního a volnoběžného systému karburátoru vysáváno dostatečné množství paliva.

Při volnoběhu je v difuzoru malý podtlak a množství přisávaného paliva je nedostatečné, proto je v karburátoru volnoběžný systém. Při volnoběžné poloze škrtkové klapky proudí mezi klapkou a stěnou vzduch malou šterbinou, do které ústí kanálky volnoběžného systému. Těmito kanálky je nasávána emulze paliva a vzduchu. Složitější volnoběžný systém, používaný ve své době u nejnovějších typů automobilových karburátorů má elektromagneticky ovládaný ventil chodu naprázdno.



Obrázek 2: Řez automobilovým spádovým karburátorem Solex 1 B3 [8]

Podobně při přechodu z volnoběžných otáček do oblasti částečného zatížení se při otevírání škrtkové klapky dostávají postupně přechodové otvory do oblasti vysokého podtlaku ve šterbině škrtkové klapky. Z těchto otvorů se nasává přídatná směs, která zajišťuje plynulost přechodu do vyšších otáček.

Při rychlém otevření škrticí klapky během náhlé akcelerace se může směs vlivem setrvačnosti palivového sloupce ochudit. Současně se při náhlém otevření škrticí klapky snižuje podtlak v nasávacím systému a z hlavního palivového systému je nasáváno menší množství paliva. V krajních případech se může směs dostat pod hranici zápalnosti a motor začne vynechávat. Aby se tomuto jevu zamezilo, je karburátor vybaven akcelerační pumpičkou. Akcelerační pumpička je ovládaná nejčastěji mechanicky vačkovým mechanismem spojeným s ovládáním škrticí klapky. Vlastní pumpička bývá pístová nebo membránová. Při rychlém otevření škrticí klapky je pumpičkou vytlačováno palivo do difuzoru.

Pro dokonalejší zabezpečení stálého směšovacího poměru a pružnějšího chodu motoru se používaly u automobilů v posledním období montáže karburátorů obvykle dvoustupňové karburátory, které měly dva postupně se otevírající difuzory. U těchto karburátorů pracuje při malých zatíženích jeden difuzor se svým palivovým okruhem a při požadavku na vyšší výkon je zapojen do činnosti druhý difuzor se svým palivovým okruhem.

2.3 Vstřikování paliva

Pro přípravu zápalné směsi u zážehových motorů se v současné době používají místo karburátorů vstřikovací systémy. Vstřikování umožňuje přesnější regulaci složení směsi paliva se vzduchem v závislosti na provozním stavu a zatížení motoru. Přesnější regulace složení směsi umožňuje produkci nižšího podílu škodlivých emisí a možnost jejich dalšího snížení používáním katalyzátoru výfukových plynů. Vstřikování má také výrazný vliv na snížení spotřeby paliva, zvýšení měrného výkonu motoru, zlepšení velikosti a průběhu točivého momentu.

Podle uspořádání regulačního obvodu rozlišujeme obvod otevřený, u kterého se směšovací poměr nastavuje elektronickou řídicí jednotkou podle otáček a zatížení motoru a uzavřený, který pomocí zpětné vazby z λ -sondy upravuje směšovací poměr tak, aby se součinitel přebytku vzduchu nacházel v úzkém rozmezí kolem hodnoty 1.

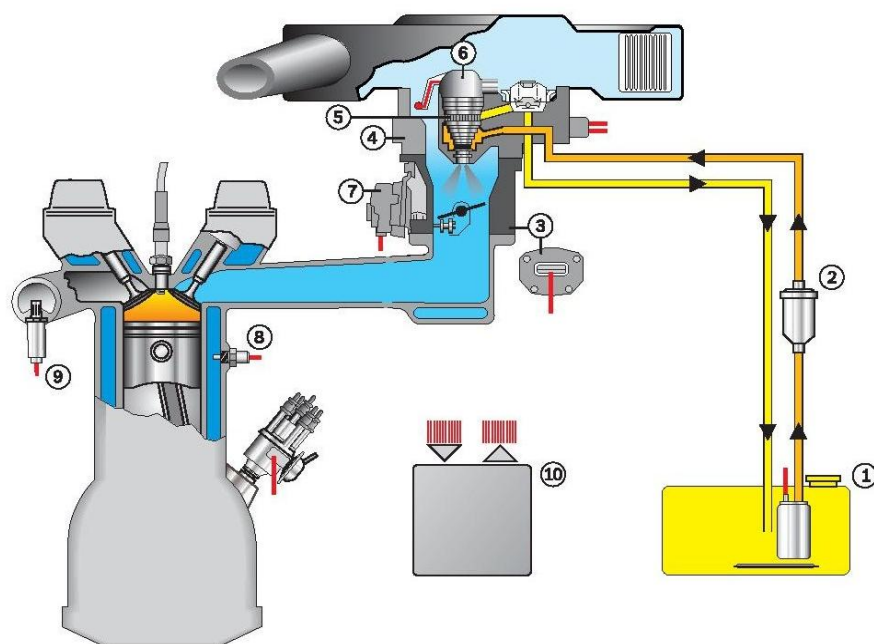
Podle způsobu dopravy paliva do spalovacího prostoru můžeme vstřikování rozdělit na vstřikování do sacího potrubí, do jednotlivých sacích kanálů nebo do válce.

V následujících kapitolách uvádím jako příklady konkrétních systémů vstřikování vstřikovací systémy od firmy Bosch, která má minimálně u evropských automobilů největší tradici a z toho plynoucí zastoupení na trhu.

2.3.1 Jednobodové vstřikování

Jednobodové vstřikování se označuje jako SPI (Single Point Injection) nebo jako centrální vstřikování CFI (Central Fuel Injection). U tohoto systému probíhá vstřikování paliva v jednom místě, centrálně před škrticí klapku. Rozptýlení paliva ve šterbině škrticí klapky a odpařování na horkých stěnách sacího potrubí zlepšuje přípravu směsi paliva se vzduchem. Na druhou stranu však příprava směsi v rozdílně dlouhých větvích potrubí, srážení par paliva na stěnách a tvorba okrajových vírů způsobuje nerovnoměrné rozdělení směsi, což je nevýhodou oproti vícebodovému vstřikování. Jednobodové vstřikování je ovšem konstrukčně jednodušší než vícebodová zařízení. Díky nižší ceně tak bylo možné nahradit karburátor vstřikováním i u vozidel nižších tříd.

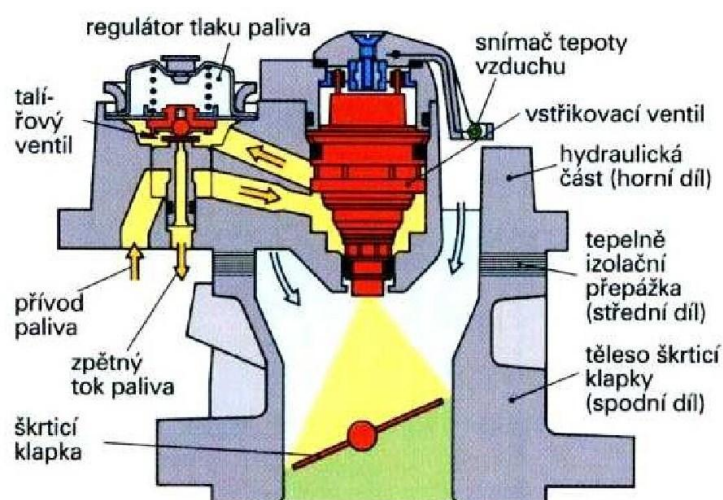
Příkladem jednobodového vstřikovacího systému je Mono-Jetronic, jedná se o elektronicky řízený centrální vstřikovací systém pro čtyřválcové motory s centrálně umístěným vstřikovacím ventilem.



- | | |
|--|---|
| ① Elektrické palivové čerpadlo | ⑥ Zařízení se senzorem teploty nasávaného vzduchu |
| ② Palivový filtr | ⑦ Nastavovač škrticí klapky |
| ③ Potenciometr škrticí klapky | ⑧ Senzor teploty motoru |
| ④ Regulátor tlaku | ⑨ Lambda sonda |
| ⑤ Elektromagnetický vstřikovací ventil | ⑩ Elektronická řídicí jednotka |

Obrázek 3: Systém vstřikování paliva Mono-Jetronic od firmy Bosch [9]

Jádrem systému je vstřikovací jednotka s jedním elektromagnetickým vstřikovacím ventilem, který přerušovaně vstřikuje palivo nad škrticí klapku. Hlavní informace o provozním stavu motoru jsou poloha škrticí klapky a otáčky motoru. Úhel natočení škrticí klapky je informací o zatížení motoru a předává se řídicí jednotce. Množství vstřikovaného paliva je určováno délkou vstřikování. Přesné množství vstřikovaného paliva je mimo zatížení a otáček motoru závislé dále na teplotě vzduchu, teplotě motoru a zbytkovém množství kyslíku ve výfukových plynech. Všechny tyto informace jsou vyhodnocovány řídicí jednotkou motoru [9].



Obrázek 4: Vstřikovací jednotka systému Mono-Jetronic [10]

Palivo je dopravováno ke vstřikovacímu ventilu s tlakovým regulátorem pomocí palivového čerpadla. Vstřikovací jednotka se skládá z regulátoru tlaku, vstřikovacího ventilu, čidla teploty vzduchu a dále z komory se škrticí klapkou a jejím ovladačem a snímačem polohy. Regulátor tlaku pomocí ventilu, který odpouští palivo zpětným vedením, udržuje konstantní tlak. Vstřikovací ventil je ovládán pomocí elektromagnetu. Při zavření ventilu je tlačena jehla ventilu do svého sedla pomocí pružiny. Při vybuzení elektromagnetu se jehla zvedne ze sedla a z prstencové štěrby je vytlačováno palivo.

Řídicí jednotka vyhodnocuje údaje o režimu provozu vozidla a podle toho přizpůsobuje složení palivové směsi. To se provádí změnou doby otevření a zavření vstřikovacího ventilu. Například při studeném startu se podle údajů ze snímače teploty motoru a vzduchu prodlouží doba vstřikování. Při ohřevu motoru se tato doba postupně zkracuje. Při volnoběhu je navíc ovládána i poloha škrticí klapky. Informace o změnách zatížení se získávají pomocí snímače polohy škrticí klapky a řídicí jednotkou je po vyhodnocení signálů směs krátkodobě obohacena.

2.3.2 Vícebodové vstřikování

Vícebodové vstřikování se označuje jako MPI (Multi Point Injection). U tohoto systému probíhá vstřikování pomocí jednotlivých vstřikovacích ventilů pro každý válec. Vstřikovací ventily jsou umístěny v sacím potrubí nebo v sacím kanálu před sacími ventily. To zajišťuje stejné podmínky pro každý válec a rozdělení směsi je rovnoměrné.

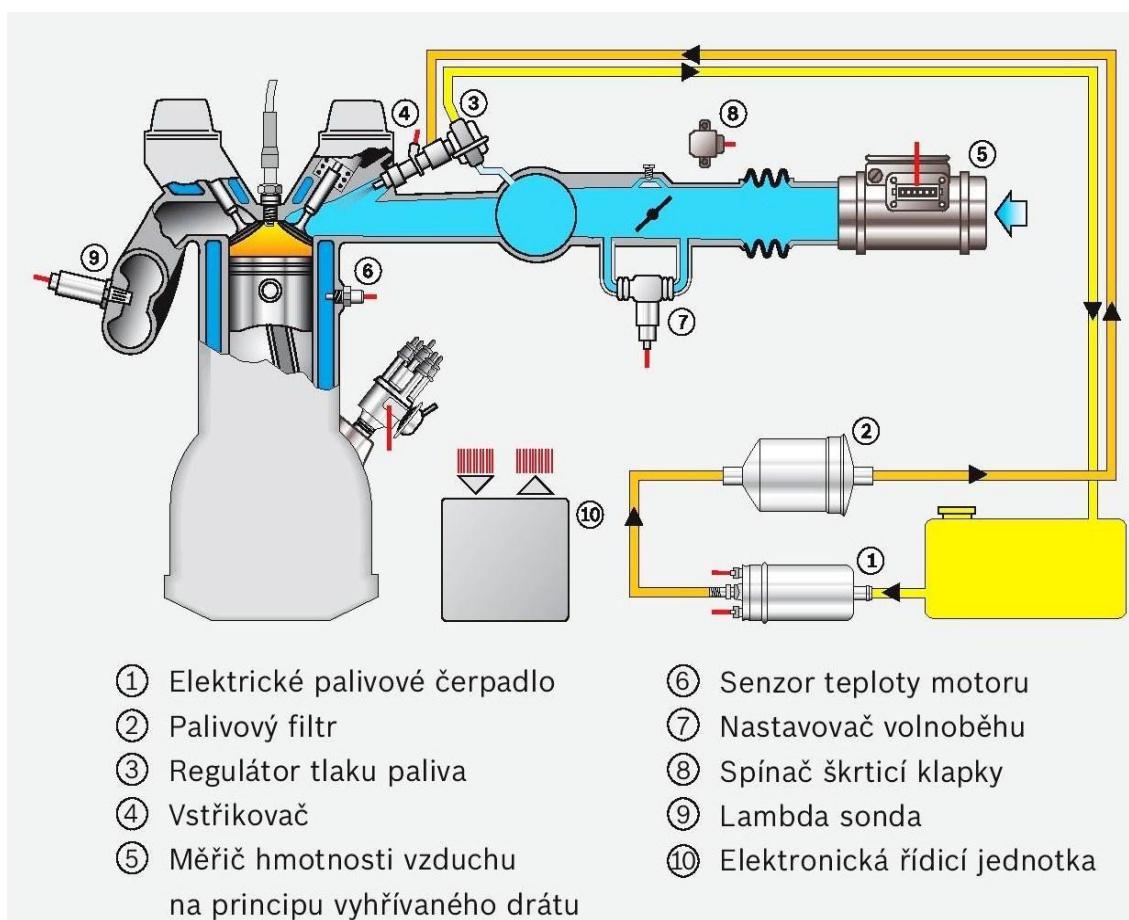
Podle časového průběhu vstřikování u vícebodového vstřikování rozlišujeme vstřikování kontinuální, simultánní, skupinové a sekvenční. Kontinuální vstřik dodává palivo do systému nepřetržitě a množství je regulováno změnou tlaku nebo regulací průtočného průřezu dávkovacího zařízení. Vstřikovací trysky jsou umístěny obvykle ve větší vzdálenosti od sacího ventilu. Dochází tak, podobně jako u karburátoru, ke značnému smáčení stěn sacího potrubí palivem. To vede k obohacování nebo k ochuzování směsi při proměnlivých režimech motoru a zvyšuje se obsah škodlivin ve výfukových plynech. Jistého zlepšení se dosáhlo použitím vstřikovacích trysek s přísáváním vzduchu, díky kterým se palivo lépe rozprašuje. Následující systémy už vstřikují palivo přerušovaně a množství je většinou regulováno délkou vstřiku. U simultánního vstřikování se vstřikovací ventily ovládají současně, bez ohledu na probíhající dobu cyklu ve válci. To znamená, že čas pro odpaření paliva a vytvoření směsi je pro jednotlivé válce různý. Pro zlepšení tvorby směsi se na každou otáčku klikové hřídele vstřikuje polovina množství paliva. V případě skupinového vstřikování se vstřikuje celé množství paliva na jeden cyklus, avšak okamžik vstřikování je společný pro více válců. Čas na vytvoření směsi pro jednotlivé válce je také různý. Tento nedostatek odstraňuje sekvenční vstřikování, u kterého je dávka paliva pro každý válec vstřikována před začátkem sání. Vstřikovací ventily jsou ovládány nezávisle na sobě v pořadí zapalování.

Vstřikovací tryska může být umístěna v blízkosti sacího ventilu a přes otevřený ventil může vstřikovat palivo do prostoru válce. Při takovémto polopřímém vstřikování dochází k minimálnímu smáčení stěn sacího potrubí a příprava směsi probíhá ve značné míře ve spalovacím prostoru.

Dalším řešením, které přispívá k omezení smáčení stěn sacího potrubí, je použití vstřikovačů s dvěma otvory, které zajišťují dokonalé rozprášení paliva nasměrované přímo proti jednotlivým sacím kanálům každého válce. Přesným nasměrováním proudu rozprášeného paliva je zabráněno kondenzaci paliva na stěnách válce.

Systémů vícebodového vstřikování paliva během doby používání vyvinulo několik. Základní princip funkce těchto systémů je však podobný. Systémy se liší například hlavními řídicími veličinami (tlak v sacím potrubí, množství vzduchu) nebo způsobem jejich měření (výkyvná klapka, drátový anemometr). Mimo elektronického řízení bylo u některých systémů použito i mechanicko-hydraulického systému ovládání (např. Bosch K-Jetronic).

Funkci vícebodového vstřikování dále popíšu na příkladu systému LH-Jetronic. Jedná se o elektronicky řízený systém vstřikování s přerušovaným vstřikem, hlavní řídicí veličiny jsou množství nasávaného vzduchu a otáčky motoru. Systém zahrnuje palivovou soustavu, elektronickou řídicí jednotku, snímače a akční členy.

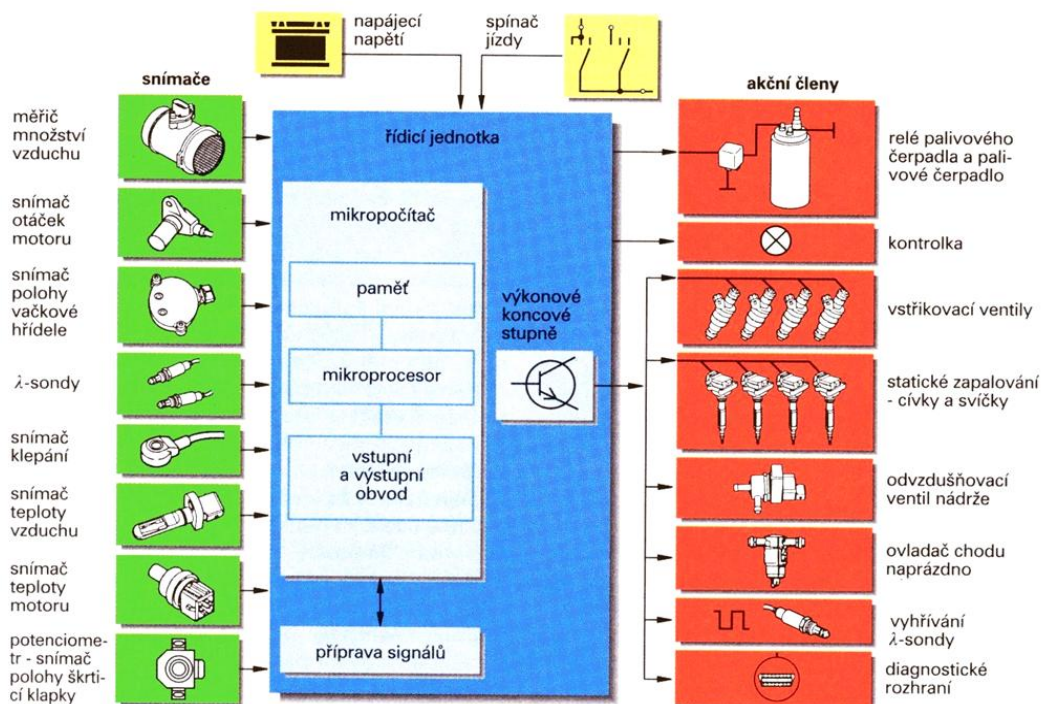


Obrázek 5: Vícebodové vstřikování Bosch LH-Jetronic [9]

Palivový systém zahrnuje palivovou nádrž, elektrické palivové čerpadlo, čistič paliva, regulátoru tlaku a relé ke spínání čerpadla. Převodní výkon palivového čerpadla je podstatně vyšší, než je maximální potřebné množství paliva. Díky tomu je při všech provozních stavech zachován tlak paliva v potrubí, které plní funkci akumulátoru. Regulátorem tlaku paliva je v potrubí udržován konstantní přetlak vůči sacímu potrubí.

Množství vstřikovaného paliva je tak řízeno pouze dobou otevření elektromagnetického vstřikovacího ventilu. Tato doby je určována elektronickou řídicí jednotkou na základě informací ze snímačů a čidel. Nejdůležitějším snímačem pro správnou tvorbu směsi je měřič množství vzduchu, který informuje o okamžitém objemovém množství nasávaného vzduchu. Mezi další údaje pro řídicí jednotku patří např. otáčky motoru, teplota vzduchu, teplota motoru, poloha škrtkové klapky a složení výfukových plynů. Obohacení směsi při spouštění motoru zajišťuje spouštěcí vstřikovací ventil umístěný ve společné části sacího potrubí. Při zahřívání je směs obohacována buď prodloužením doby vstřiku, nebo pomocí spouštěcího ventilu. Při volnoběhu zajišťuje konstantní otáčky při různých provozních podmínkách a také úsporu paliva a příznivé emise výfukových zplodin ovladač chodu na prázdnou. Jedná se o válcové šoupátko, ovládané pomocí řídicí jednotky, které otevírá a zavírá obtok škrtkové klapky. Informace o volnoběhu nebo naopak o plném zatížení dostává řídicí jednotka od spínače polohy škrtkové klapky, který rozeznává obě koncové polohy klapky.

Kompletní řešení elektronického řízení vstřikování a zapalování představuje systém Motronic, ve kterém jsou obě funkce řízeny společnou řídicí jednotkou. V řídicí jednotce jsou uložena datová pole hodnot pro provoz při různých podmínkách. Skutečné hodnoty zjištěné snímači se v řídicí jednotce porovnávají s uloženými daty a pro daný provozní stav motoru jsou řídicí jednotkou ovládány jednotlivé akční členy.



Obrázek 6: Zjednodušené blokové schéma systému Bosch Motronic [11]

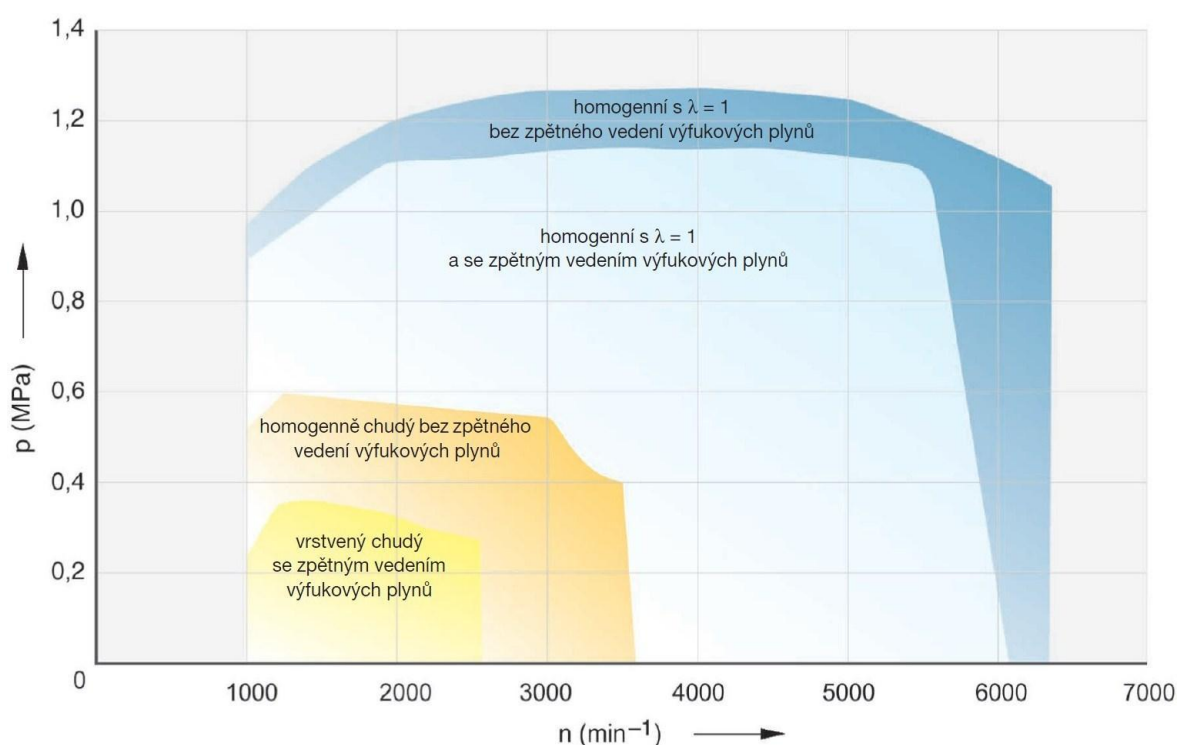
2.3.3 Přímé vstřikování

Přímé vstřikování u zážehových motorů označuje jako GDI (Gasoline Direkt Injection) nebo se používá označení vrstvené vstřikování paliva FSI (Fuel Stratified Injection). U motorů s přímým vstřikem se směs paliva se vzduchem vytváří ve spalovacím prostoru, jedná se tedy o systém s vnitřní tvorbou směsi. Sacím ventilem do prostoru válce proudí pouze vzduch a palivo je do spalovacího prostoru vstřikováno speciálními vstřikovacími ventily. Tento typ vstřikování je známý již poměrně dlouhou dobu, ale zejména z důvodů technické komplikovanosti nebyl příliš rozšířen. K jeho současnému výraznému rozšíření vedly hlavně vysoké nároky na limity škodlivých emisí, požadavek nízké spotřeby paliva a v neposlední řadě vyřešení technických problémů s tvorbou vrstvené směsi.

Výhodou tohoto systému je to, že palivo nemůže kondenzovat na stěnách sacího potrubí. Nevznikají tak tedy žádné kondenzační ztráty. Další výhodou je to, že motor dokáže pracovat s vrstvenou směsí, což vede k úspoře paliva. Naopak drobnou nevýhodou je to, že při provozu na chudou směs není schopen katalyzátor eliminovat přebytek oxidů dusíku. Tento problém se řeší použitím zásobníkového katalyzátoru a využitím recirkulace výfukových plynů.

Výkon motoru se neřídí omezováním množství nasávaného vzduchu škrticí klapkou. Pokud je škrticí klapka v sacím potrubí instalována, je většinu doby běhu motoru maximálně otevřena, což se též příznivě projeví na snížení sacích ztrát. K řízení výkonu se používá dávkování paliva, z čehož plyne, že složení směsi je proměnlivé. V oblasti nízkého zatížení pracuje motor s vrstvenou směsí. Palivo je do spalovacího prostoru vstřikováno v době komprese krátce před okamžikem zážehu. Během krátké doby před zážehem je směs prouděním ve válci dopravena do prostoru zapalovací svíčky. K optimálnímu proudění vzduchu ve válci napomáhá tvar sacího kanálu a tvarování dna pístu. Při tomto režimu plnění je směs z pohledu celého spalovacího prostoru velmi chudá. Velký přebytek vzduchu se projeví zvýšenou tvorbou oxidů dusíku. Náprava tohoto stavu se provádí vysokou mírou recirkulace výfukových spalin. Zpětně přiváděné spaliny snižují teplotu spalování a tím snižují produkci oxidů dusíku. Při vysokém zatížení motoru se místo vrstvené směsi přechází na provoz se stechiometrickou směsí. Palivo se do válce vstřikuje již v době sání, a proto se směs může rovnoměrně promísit v celém prostoru. Další možností je provoz s homogenní chudou základní směsí a navíc směsí vrstvenou. V tomto případě je při sání vstřiknuto

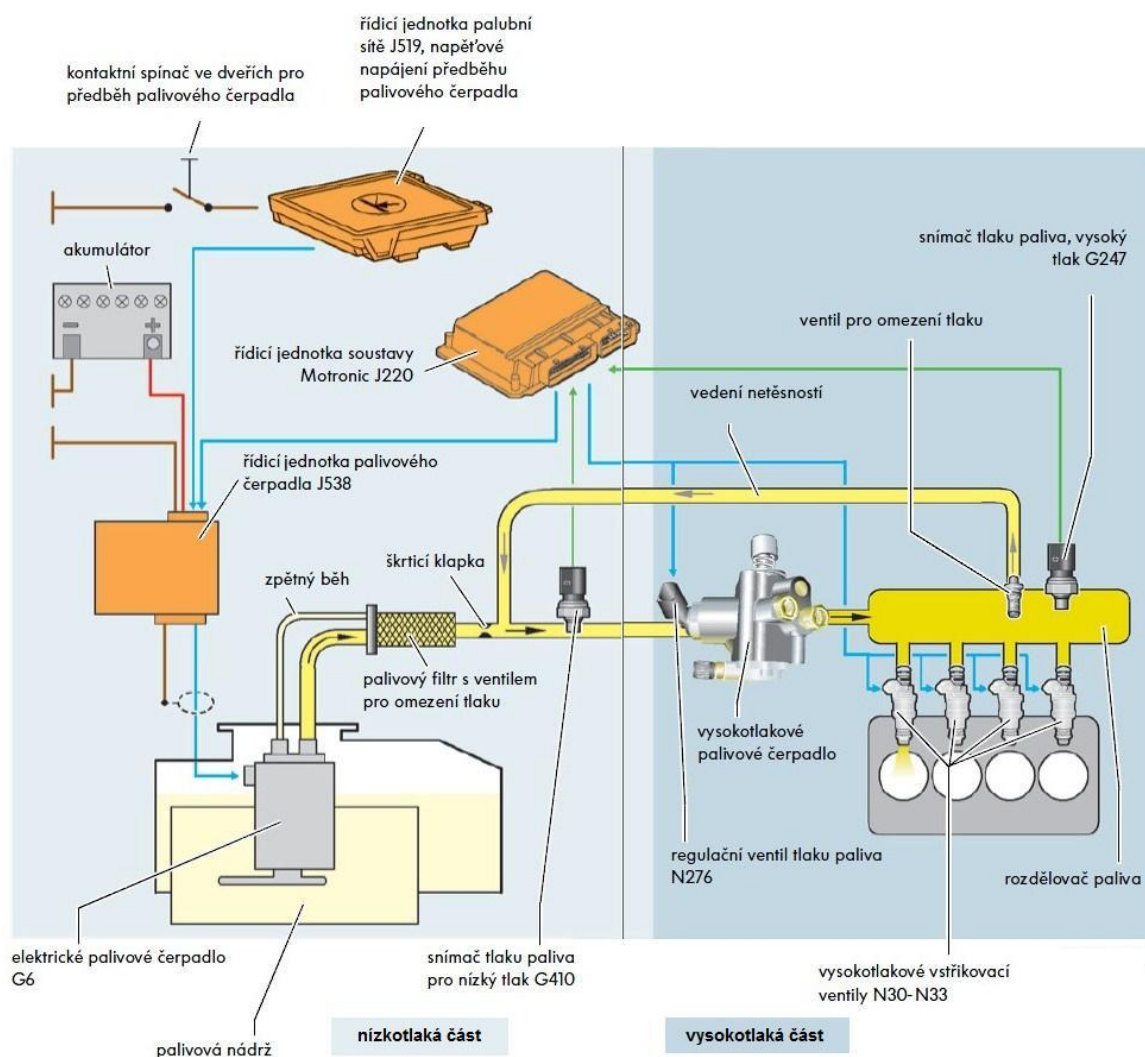
menší množství paliva a v době komprese dojde k druhému vstřiku. Tím se docílí toho, že u svíčky je oblast bohatší směsi, která je lehce zapálitelná a dokáže svým plamenem zapálit chudou směs ve zbývajícím prostoru. Tento provoz je aktivován při přechodu mezi režimem spalování homogenní a vrstvené směsi. Oproti provozu s vrstveným plněním vzniká menší množství pevných částic a oproti homogennímu provozu snižuje spotřebu paliva. Další druh dvojího vstřikování zajišťuje rychlý ohřev výfukového systému. Ohřevu se docílí druhým pozdním vstřikem, díky čemuž tato část paliva shoří velmi pozdě a dojde k výraznému zvýšení teploty výfukových spalin.



Obrázek 7: Provozní režimy motoru 2,0 FSI [15]

Příkladem systému přímého vstřikování je systém zavedený společně firmou Bosch a koncernem VW. Jedná se o systém označovaný jako FSI, u přeplňovaných motorů jako TFSI a později u některých automobilek jako TSI. Systém se skládá z nízkotlaké a vysokotlaké palivové části. Nízkotlaká část obsahuje elektronicky řízené nízkotlaké palivové čerpadlo, které se nachází v palivové nádrži. Tímto čerpadlem je palivo dopravováno přes palivový filtr s ventilem pro omezování tlaku do vysokotlakého palivového čerpadla. V tomto případě se jedná o jednopístkové čerpadlo poháněné speciální vačkou na vačkové hřídeli sacích nebo výfukových ventilů. Palivo je vysokotlakým čerpadlem dopravováno do tlakového zásobníku, ve kterém je tlak regulován regulačním ventilem. Z této společné palivové lišty je palivo pomocí

vstřikovacích ventilů dávkováno do spalovacího prostoru. Zapalování a vstřikování je společně ovládáno řídicím systémem Motronic.



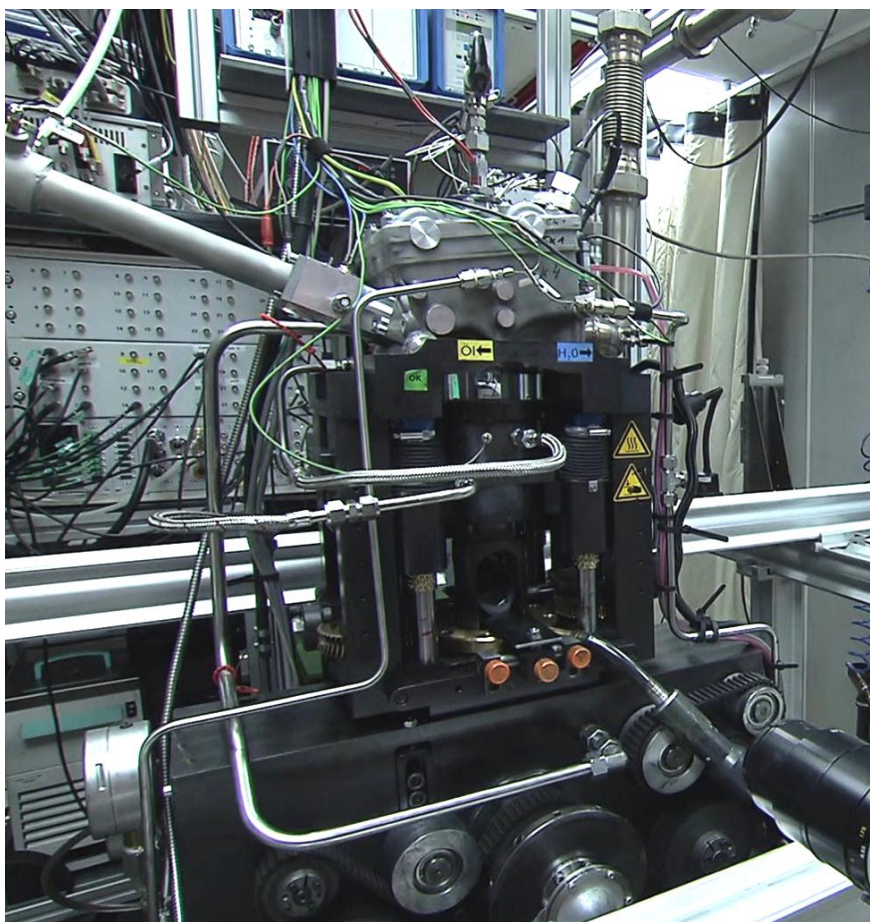
Obrázek 8: Palivový systém motoru FSI [14]

Alternativně se vyrábějí také motory s kombinací přímého vstřikování FSI a nepřímého vícebodového vstřikování MPI. Při částečném zatížení je ve funkci nepřímé vstřikování a ve výkonnostním režimu přímé vstřikování. Tato kombinace spolu s variabilním ovládáním výfukových ventilů omezuje tvorbu emisí oxidů dusíku, i pevných částic a snižuje spotřebu paliva. Tento systém vstřikování používá například motor 1.8 TSI s maximálním výkonem 132 kW z konstrukční řady EA888 montovaný do třetí generace vozu Škoda Octavia [8].

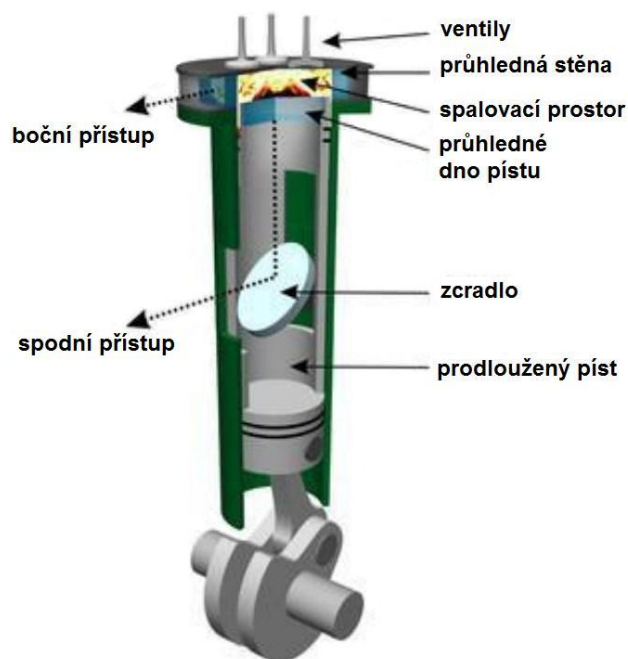
3 Vizualizace dějů uvnitř spalovacího motoru

3.1 Transparentní motor

Jedním z přímých optických přístupů k výzkumu dějů uvnitř spalovacího prostoru je použití transparentního motoru. Zpravidla se jedná o specializované zařízení s jedním válcem, kde jsou některé části upraveny tak, aby byl umožněn vizuální pohled do spalovacího prostoru. Za tímto účelem jsou některé díly vyrobeny ze speciálního safírového skla. Safírové sklo je syntetický korund, který dobře odolává podmínkám uvnitř motoru, zejména otěru a vysokým teplotám. Z tohoto skla bývá zhotovena stěna válce, což umožňuje přímé sledování děje uvnitř válce. Dalším průhledným dílem bývá dno pístu, který je oproti standardnímu pístu upraven a prodloužen tak, aby bylo umožněno sledování spalovacího prostoru zespodu skrz dno pístu pomocí zrcadla. Někdy je použit i průhled ze shora do spalovacího prostoru, kdy je v hlavě vytvořeno okno mezi ventilovými sedly a obraz je opět snímán přes zrcadlo.

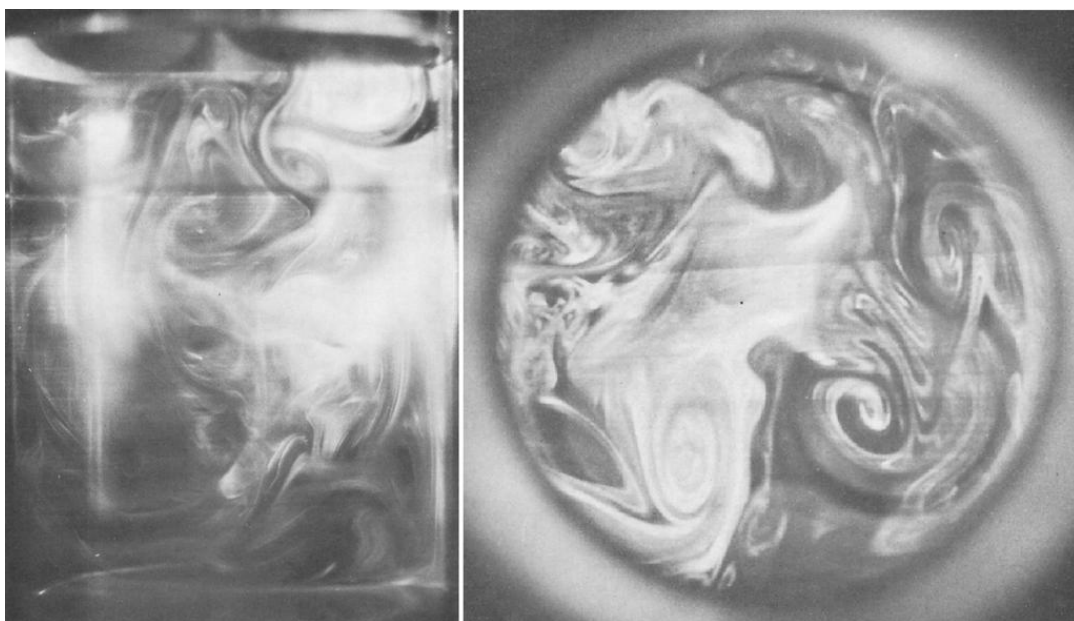


Obrázek 9: Transparentní motor Bosch pro výzkum přímého vstřikování [17]



Obrázek 10: Prodloužený píst transparentního motoru [16]

Transparentní motory se využívají především pro optický přístup do spalovacího prostoru, díky čemuž je možno provádět výzkum například přímého vstřikování paliva u zážehových nebo vznětových motorů, dále výzkum proudění uvnitř spalovacího prostoru nebo postup plamene při vznětu či zážehu. Výstupem je video pořízené vysokorychlostní kamerou, nebo záznam tvorby směsi pomocí metody LIF (Laser Induced Fluorescence), což je spektroskopická metoda měřící emisi fluorescenčního elektromagnetického záření prvků.



Obrázek 11: Vizualizace proudění ve spalovacím prostoru – boční a spodní pohled [18]

3.2 Endoskopická technika

Vizualizace pomocí endoskopu se používá pro přímé sledování rychlých dějů na jakémkoliv spalovacím motoru. Při vývoji spalovacích motorů je žádoucí optimalizace proudění v sacích kanálech a ve válci motoru pro získání nejvyšší možné účinnosti. Vizualizace dějů uvnitř motoru je proto důležitým pomocníkem k optimalizaci tvorby směsi a hoření. Děje se sledují optickým pozorováním a výsledkem jsou obrazy nebo videozáznamy, které se dále upravují specializovanými programy. Výsledkem postprocesingu mohou být například rozdílové snímky či teplotní pole.

Endoskopická technika nachází uplatnění v mnoha oblastech výzkumu pístových spalovacích motorů. Může být použita pro zkoumání mechanického pohybu pohyblivých částí, jako je například ventilový rozvod nebo kliková skupina. Další možností využití je vizualizace v oblasti vstřikování a přípravy směsi, jedná se o děje jako vstřík do sacího kanálu, jeho průběh, směr a tvar. Použitím chlazeného endoskopu je umožněn výzkum i uvnitř spalovacího prostoru, kde se můžeme soustředit na přímé vstřikování, zapalovací jiskru, rozvoj a šíření plamene atd.

Dále přiblížím konkrétněji endoskopickou techniku používanou Katedrou vozidel a motorů Technické univerzity v Liberci. Jedná se o zařízení AVL VisioScope.

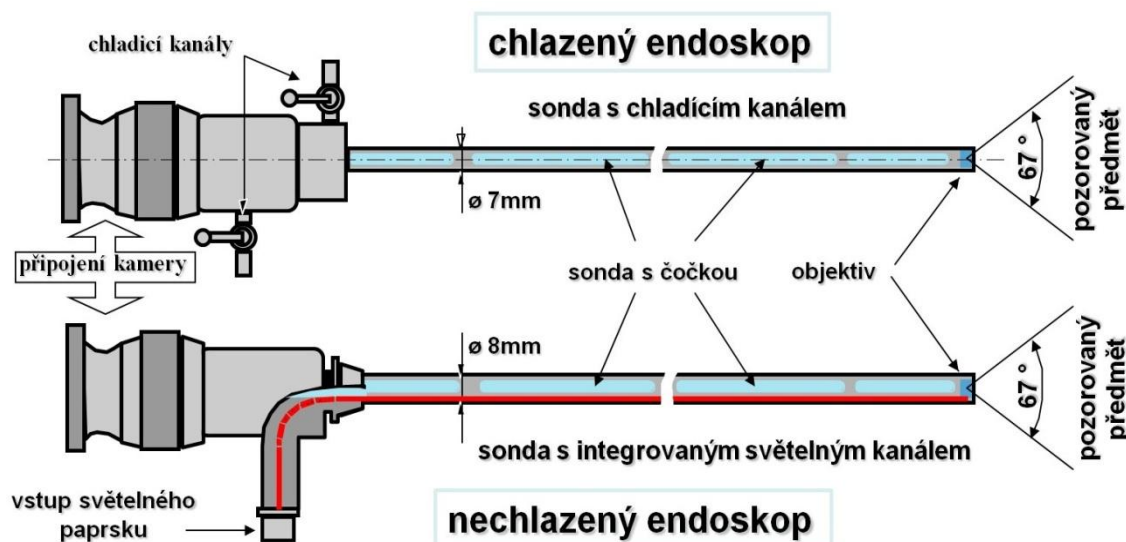


Obrázek 12: Zařízení AVL VisioScope [2]

3.2.1 Endoskop

Pro vizualizaci dějů uvnitř spalovacího motoru se používají dva základní druhy endoskopů. Nechlazené endoskopy se používají pro sledování dějů za nízkých teplot (do 100°C). K tomuto nechlazenému endoskopu se připojuje zdroj světla. Zařízení VisioScope umožňuje pomocí optického vlákna připojení buď permanentního zdroje světla, nebo zdroje záblesků. Sonda nechlazeného endoskopu má průměr 8 mm a zorný úhel je 67°. Zařízení VisioScope má k dispozici tři typy nechlazených endoskopů, které se liší úhlem směru pozorování od osy sondy. Tento úhel je 0°, 30° a 70°. Výrobce endoskopů pro toto zařízení je firma KARL STORZ GmbH.

Pro vizualizaci dějů za vysokých teplot, například ve válci motoru, se používají chlazené endoskopy. V případě VisioScope se jedná o tři vzduchem chlazené endoskopy s vnějším průměrem sondy 7 mm, zorným úhlem 67° a s úhlem pozorování stejně jako u chlazených endoskopů (0°, 30° a 70°).



Obrázek 13: Chlazený a nechlazený endoskop [2]

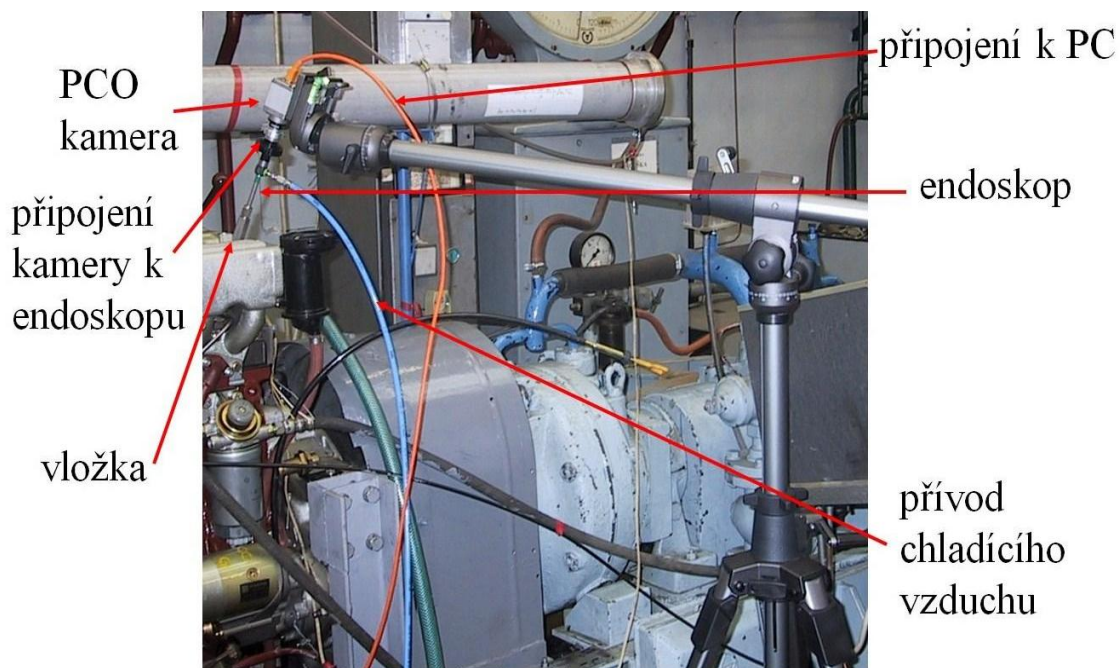
3.2.2 Kamera

K endoskopu se připojuje kamera a to buď přímo, nebo pomocí optického kloubového vedení. Standardní kamera je digitální barevná VGA kamera. Konkrétně se jedná o kameru PCO PixelFly. Rozlišení této kamery je 640x480 pixelů a kamera umožňuje vytvořit 50 snímků za sekundu. Druhou používanou kamerou je vysoce citlivá digitální černobílá kamera PCO DIGICAM Pro. Kamera má rozlišení 1280x1024 pixelů a umožňuje vytvořit 8 snímků za sekundu.

Pro tvorbu obrazového záznamu jsou obrazy zachycené kamerou pomocí počítače a příslušného programu synchronizovány s příslušnou polohou otočení klikové hřídele pomocí signálu ze snímače otáček, který slouží jako časová základna.

3.2.3 Příklad měření pomocí zařízení VisioScope

Měření na vznětovém motoru AVIA – vizualizace hoření směsi pomocí chlazeného endoskopu vedeného hlavou válců do spalovacího prostoru.



Obrázek 14: Umístění kamery při vizualizaci dějů uvnitř válce – měření na motoru AVIA [2]



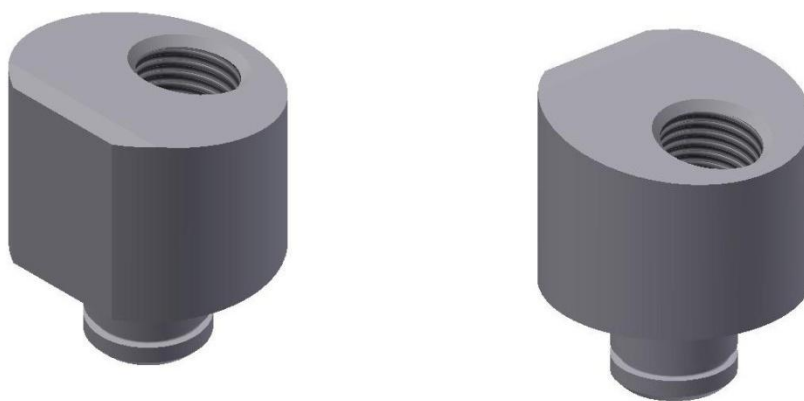
Obrázek 15: Variabilita plamene - měření na motoru AVIA [2]

4 Konstrukční úpravy k zavedení endoskopu

V této kapitole budu popisovat mnou navržené úpravy měřeného motoru k zavedení endoskopu pro vizualizaci vstřikování paliva do sacího potrubí. Úprava a vlastní měření byla provedena na nepřepřlňovaném zážehovém čtyřválcovém motoru se zdvihovým objemem 1598 cm³. Jedná se o motor Škoda Auto z konstrukční řady EA211. Tento motor má šestnáctiventilovou hlavu – každý válec má dva sací a dva výfukové ventily. Kanál sacích ventilů je směrem od sacího potrubí společný pro oba sací ventily jednoho válce a ve své dolní části se rozděluje na dvě větve.

4.1 Endoskop zavedený do sacího potrubí

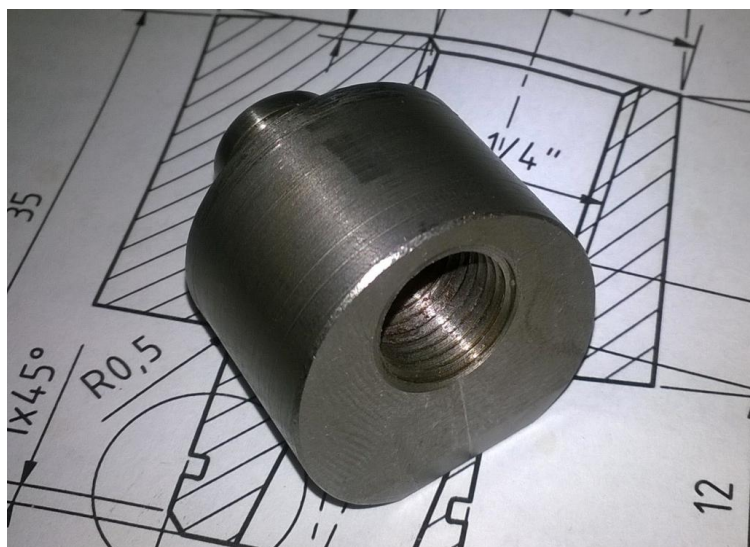
Upravovaný motor má sací potrubí z plastu, takže moje první myšlenka na úpravu pro zabudování endoskopu byla taková, že se na vhodném místě potrubí vytvoří otvor a vyrobí se vložka, která se zde přilepí. Druhou možností přístupu skrz sací potrubí bylo využití potrubí pro motor spalující mimo benzínu také CNG. Toto sací potrubí má na příhodném místě každého kanálu pouzdra pro ventil CNG. Díky tomuto řešení se nemuselo do potrubí vrtat a lepit vložky. Pomocí CAD programu jsem vymodeloval vložku a upravil její tvar a rozměry tak, aby bylo možno touto vložkou vést sondu nechlazeného endoskopu pokud možno co nejhlouběji ke vstřikovacímu ventilu a nikde nenastala kolize sondy se stěnami kanálu.



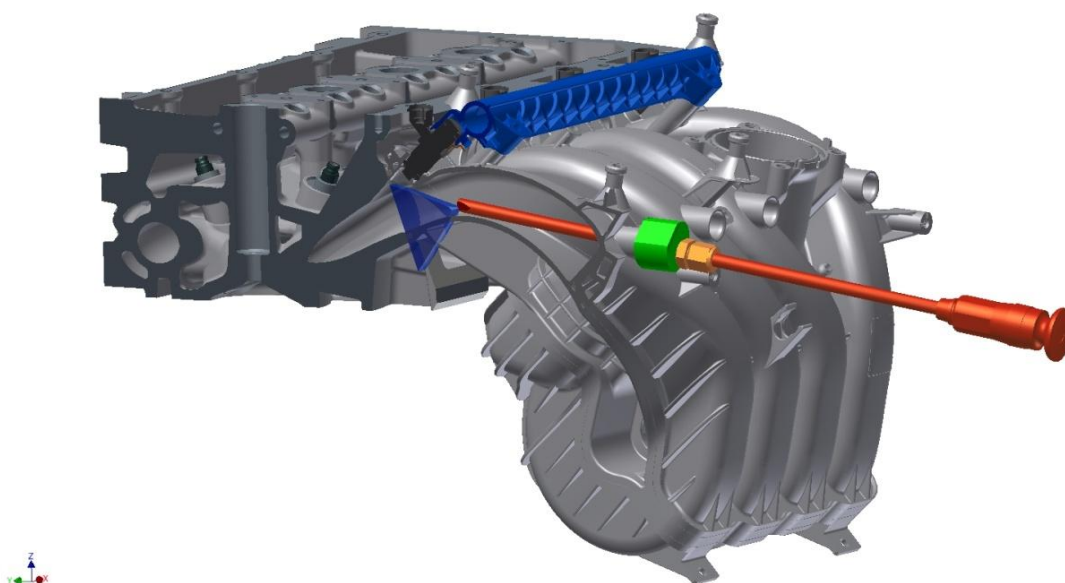
Obrázek 16: Model vložky endoskopu do sacího potrubí [20]

Dalším požadavkem bylo to, aby byla čočka endoskopu co nejbližší ose sacího kanálu. Toho bylo docíleno volbou vhodného úhlu mezi osou vložky a osou sondy endoskopu a natočením vložky v plastovém pouzdře potrubí. Podle 3D modelu jsem také navrhl, že nejvhodnější bude použit endoskop s úhlem pozorování 30° . Ostatní otvory po ventilech CNG byly zaslepeny zátkami.

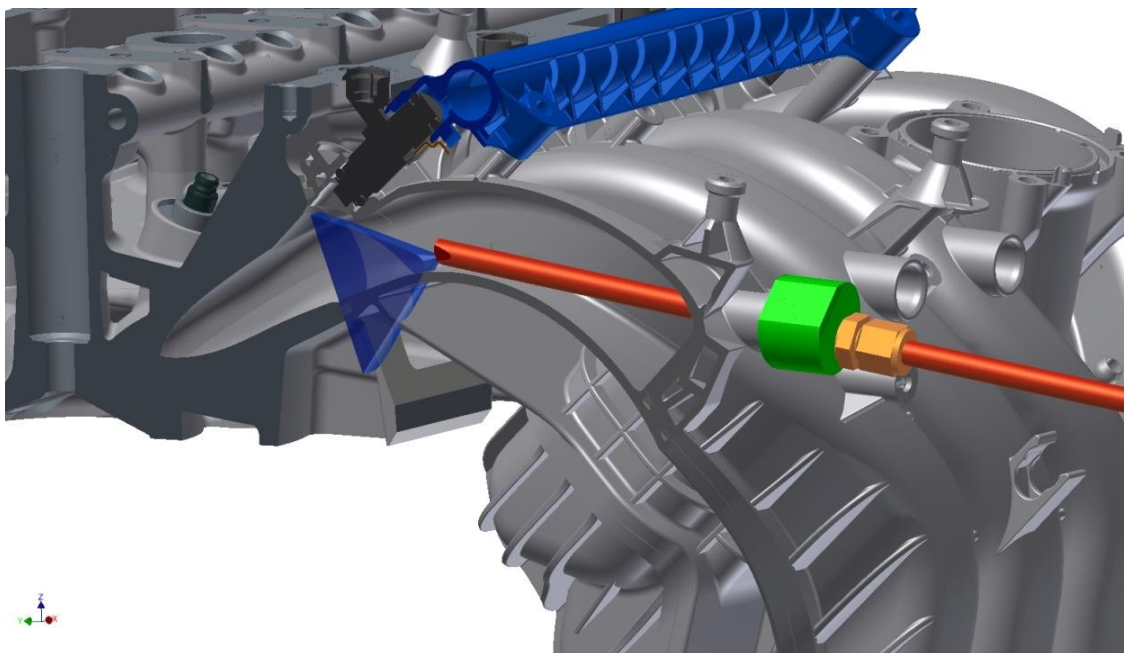
Podle navrženého modelu jsem tuto vložku vyrobil. Vložka je vyrobena z oceli, otvor pro sondu endoskopu je vůči ose vložky odkloněn o úhel 10° a ve vložce je vytvořen závit G1/4" pro upevňovací matici sondy endoskopu. Pro utěsnění v potrubí byla ve vložce zhotovena drážka pro o-kroužek.



Obrázek 17: Vložka endoskopu do sacího potrubí

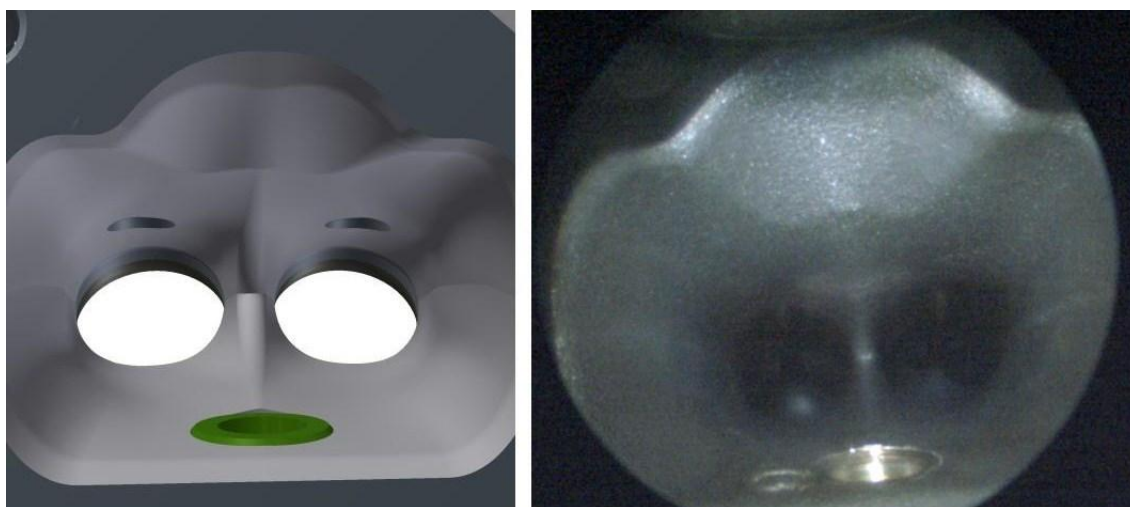


Obrázek 18: Umístění vložky v sání - celkový pohled [20]



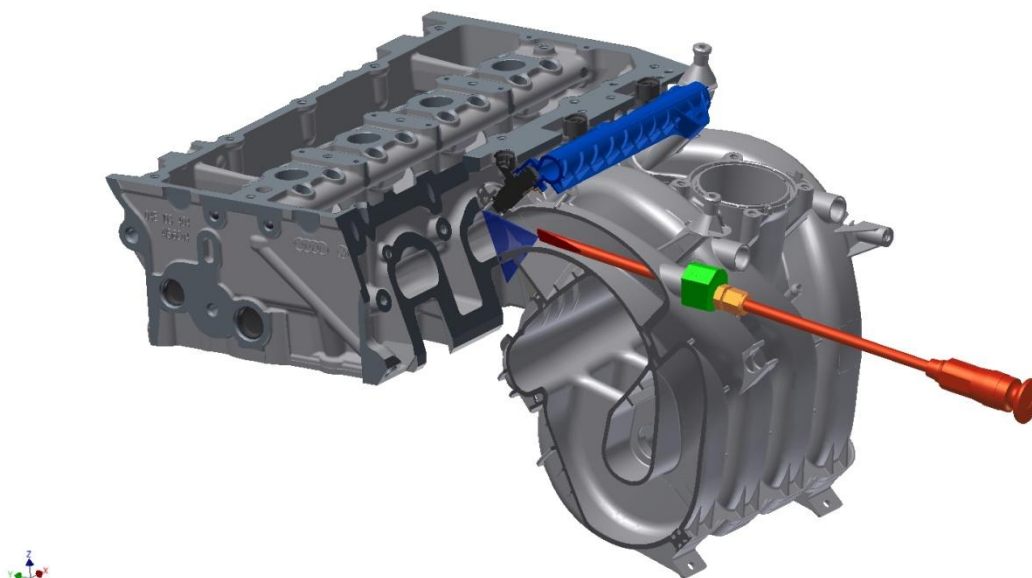
Obrázek 19: Umístění vložky v sání - detail s vyznačením zorného pole endoskopu [20]

Pomocí 3D modelu jsem také získal předběžnou představu o tom, co bude pomocí takto instalovaného endoskopu vidět. Provedl jsem řez modelem a nastavil pohled příslušný umístění endoskopu a jeho úhlu pozorování. Na pohledu je vidět sací kanál v hlavě v celé své délce až k ventilovým sedlům. V dolní části pohledu je vidět umístění vložky endoskopu pro druhou variantu umístění endoskopu, která je popsána dále. Pohled z modelu se od skutečného pohledu získaného z instalovaného endoskopu mírně liší, je to dáno zejména různým zorným úhlem a zkreslením perspektivou promítání modelu. Pro utvoření představy, co bude z takto instalovaného endoskopu vidět v záběru je však pohled z modelu dostačující.



Obrázek 20: Porovnání přibližného pohledu endoskopu z 3D modelu a skutečného pohledu získaného endoskopem při měření [20]

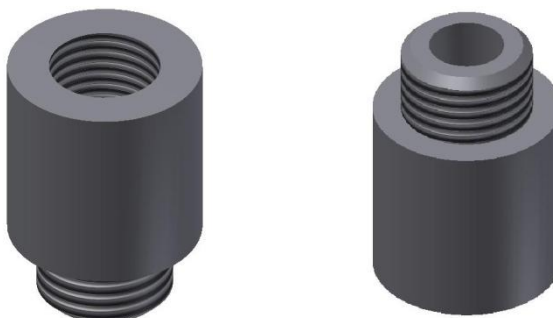
Další výhodou tohoto řešení vložky, jak se ukázalo pomocí modelu, bylo to, že v případě potřeby by se dala vložka pro endoskop umístit i do sacího kanálu druhého válce a vhodným natočením vložky by se dosáhlo umístění čočky endoskopu v ose kanálu. To by v případě potřeby umožnilo provádět vizualizaci na více válcích bez nutnosti vyrábět a případně lepit či jinak upevňovat další vložky.



Obrázek 21: Umístění endoskopu v sacím kanálu druhého válce [20]

4.2 Endoskop zavedený skrz stěnu hlavy válců

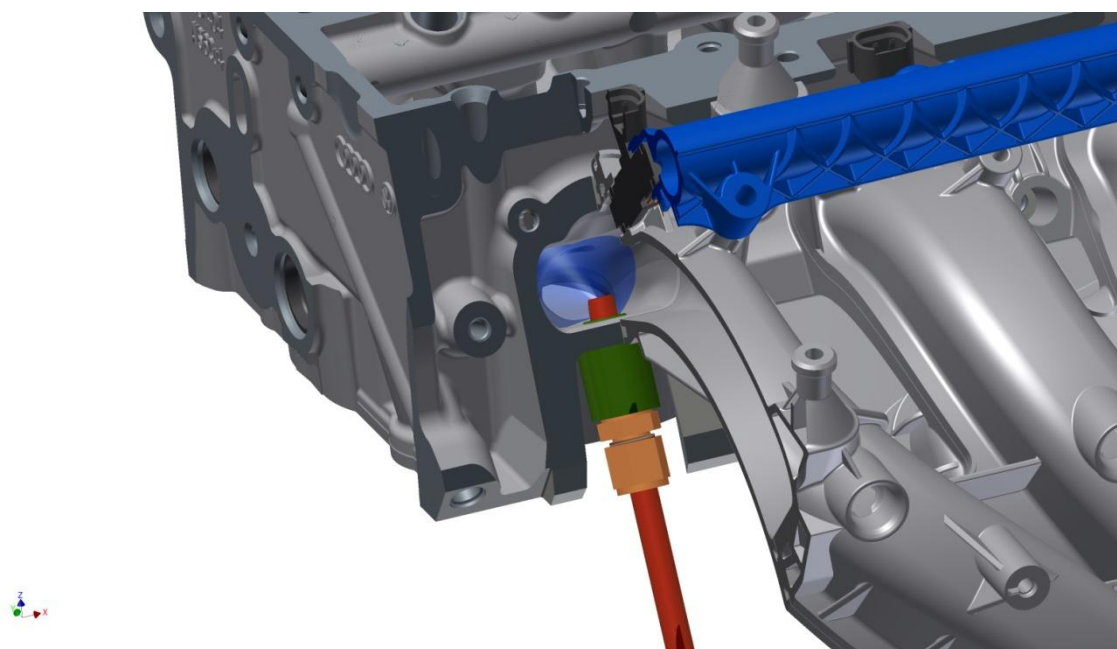
Dalším místem, kde bylo možné umístit vložku pro endoskop, byla spodní stěna sacího kanálu v hlavě válců. V místě prvního válce motoru byl dostatek prostoru pro umístění endoskopu. K realizaci tohoto řešení byla vyrobena druhá vložka pro uchycení endoskopu. Ve vhodném místě stěny sacího kanálu byl zespodu vyvrtán otvor, do kterého se vyřízl závit. Do tohoto otvoru byla vložka zašroubována a pro zajištění a utěsnění bylo použito speciální lepidlo.



Obrázek 22: Model vložky endoskopu do sacího kanálu v hlavě válců [20]

Pomocí 3D modelu jsem opět navrhl optimální směr pozorování. Pro takto umístěný endoskop bylo možné provést vizualizaci pro dva směry snímání obrazu. V prvním případě byl endoskop s úhlem pozorování 70° natočen směrem k sacím ventilům a v druhém případě byl použit endoskop s úhlem pozorování 30° a pohled směřoval proti vstřikovači. Bylo tak možné zaznamenat tvorbu směsi v sacím kanálu i vývoj a průběh výstřiku paliva ze vstřikovacího ventilu.

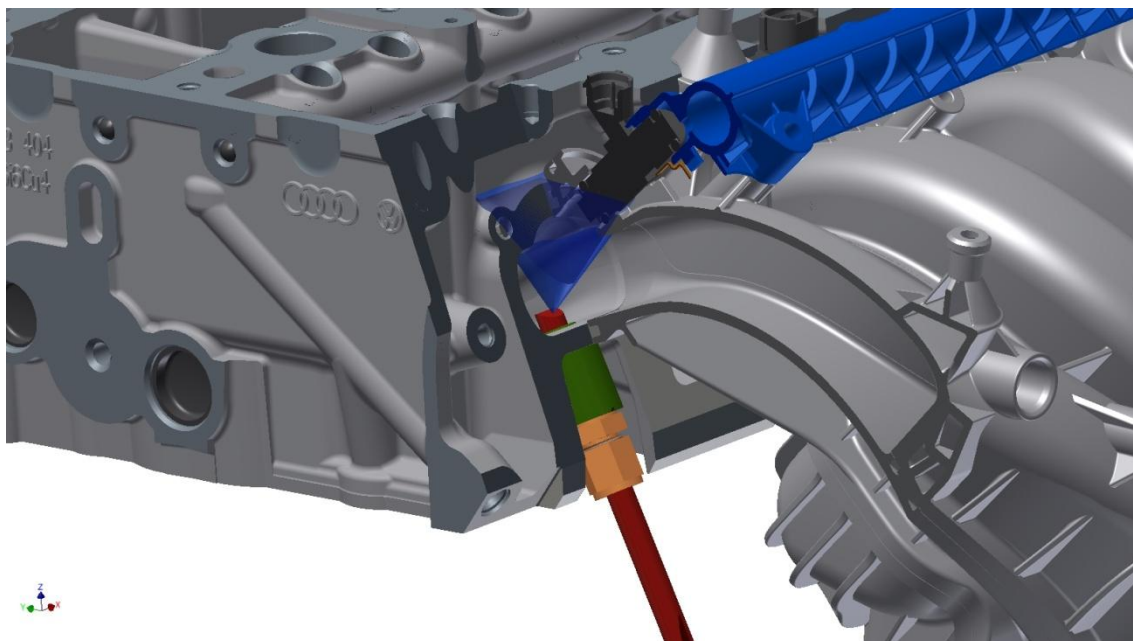
I pro tuto variantu umístění endoskopu jsem z modelu vytvořil obrazy přibližných pohledů endoskopu, jak pro pohled na ventily, tak pro pohled na vstřikovač.



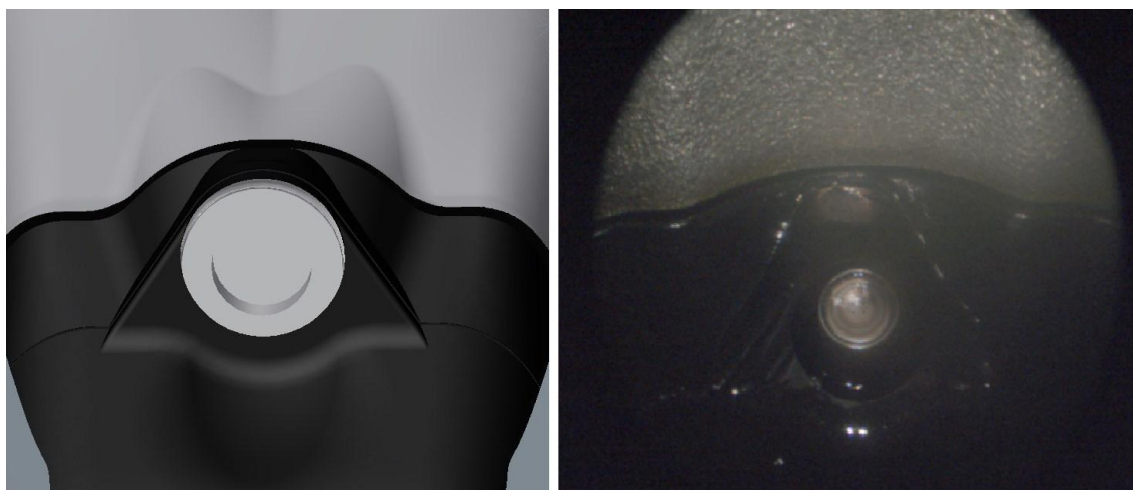
Obrázek 23: Endoskop ve stěně sacího kanálu – detail s vyznačením zorného pole při pohledu na sací ventily [20]



Obrázek 24: Porovnání přibližného pohledu endoskopu z 3D modelu a skutečného pohledu získaného při měření – pohled na ventily [20]



Obrázek 25: Endoskop ve stěně sacího kanálu – detail s vyznačením zorného pole při pohledu na vstřikovač [20]

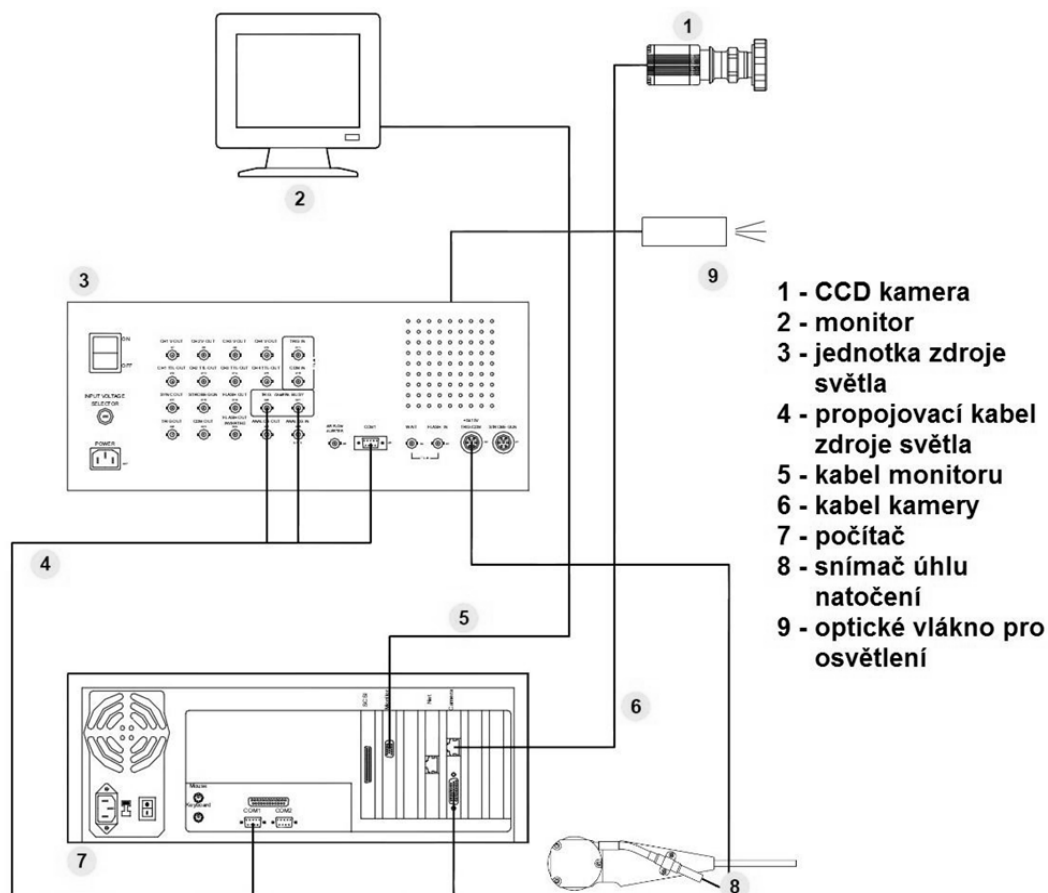


Obrázek 26: Porovnání přibližného pohledu endoskopu z 3D modelu a skutečného pohledu získaného endoskopem při měření – pohled na vstřikovač [20]

5 Měření

5.1 Měřicí zařízení

K vizualizaci vstřikování bylo použito zařízení AVL VisioScope. Pro všechna měření byl použit nechlazený endoskop a barevná VGA kamera PCO PixelFly. S vizualizačním systémem byla dále synchronizována indikační aparatura. Motor byl instalován na stanovišti s dynamometrem Schenck WT 190.



Obrázek 27: Schematický diagram zapojení zařízení AVL VisioScope [19]

Nechlazený endoskop byl optickým vedením připojen na jednotku zdroje světla, pro měření se použilo osvětlení pomocí stroboskopických záblesků. Tyto záblesky jsou synchronizovány se záznamem obrazu z kamery. K určení polohy klikové hřídele byl použit inkrementální snímač s rozlišením $0,1^\circ$. Princip tvorby záznamu je takový, že každý následující snímek je kamerou zachycen po uplynutí jednoho nebo i více cyklů (v závislosti na otáčkách motoru) po přičtení příslušného pootočení klikové hřídele mezi snímky. Pokud se nepřičte pootočení mezi snímky, může takový záznam sloužit k vyhodnocení variability vstřiku pro jeden konkrétní okamžik.

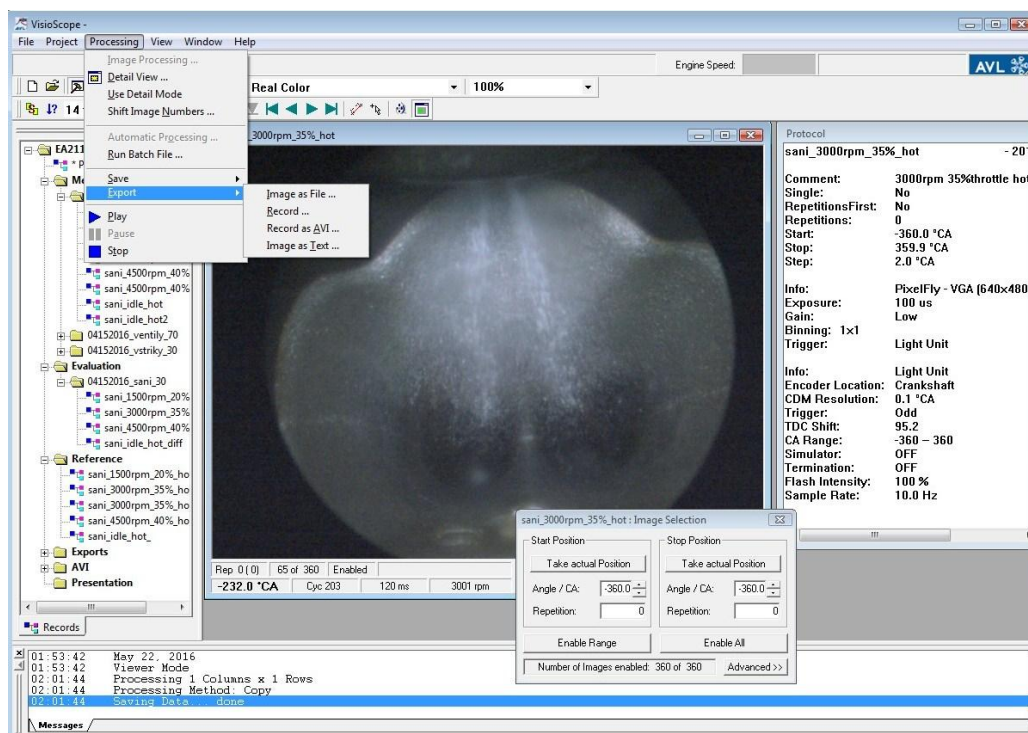
5.2 Průběh měření

Na motoru byla provedena čtyři měření (záznam čtyř různých pohledů), každé měření pro čtyři režimy zatížení (při volnoběhu, 1500, 3000 a 4500 otáčkách za minutu). Pro všechny režimy se zařízením VisioScope prováděl záznam obrazu v rozsahu od -360° do $+360^\circ$ pootočení klikové hřídele a krok záznamu byl nastaven po 2° . Všechna čtyři měření byla prováděna na prvním válci motoru.

Konkrétní otáčky, zatížení a ostatní zaznamenané parametry pro každé měření jsou v následujících kapitolách shrnuty v příslušných tabulkách a grafech. Při výpočtu průměrných hodnot zaznamenaných parametrů při měření jsem do výpočtu nezahrnoval hodnoty naměřené v průběhu cca 30 sekund po změně zatížení, aby byly průměrné hodnoty počítány pouze z dat naměřených v ustáleném stavu.

5.3 Výstupy z měření

Záznamy z měření jsem zpracoval v programu AVL VisioScope 1.5. Provedl jsem export obrazových záznamů ve formátu .png a videozáznamů ve formátu .avi. Na exportovaných datech jsou přidány informace o zatížení motoru, otáčkách a také příslušná poloha klikové hřídele. Díky těmto identifikačním datům lze mezi sebou snadno porovnávat záznamy získané ze všech čtyř měření. Exportovány byly obrázky a videa v celém naměřeném rozsahu od -360° do $+360^\circ$ natočení klikové hřídele.

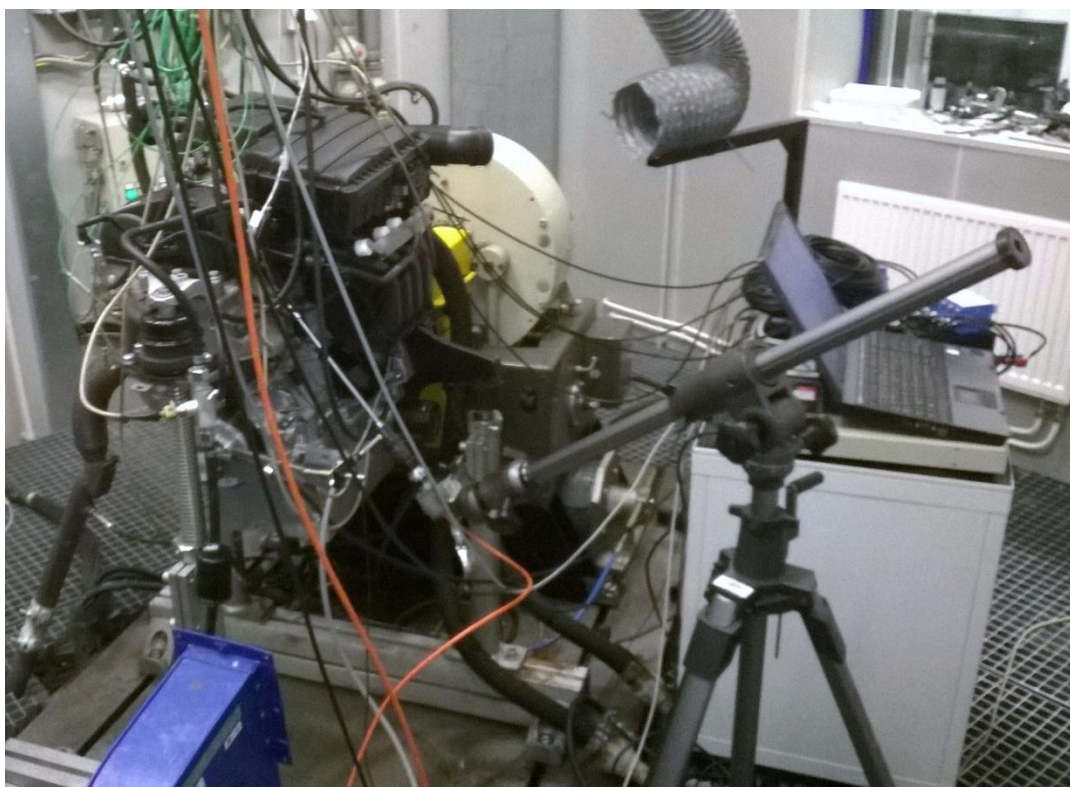


Obrázek 28: Pracovní okno programu AVL VisioScope 1.5

Vytvořené záznamy nám umožňují získat představu o dějích při vstřikování paliva do sacího kanálu a při následném nasávání směsi do válce motoru. Díky tomu, že bylo provedeno několik měření při stejných provozních podmínkách motoru, ale s jiným umístěním a pohledem endoskopu, je možné snímky z různých pohledů mezi sebou porovnávat, což nám umožní vytvořit si kompletnější představu o chování směsi po vstřiku (tvar paprsku, jeho rozpad a víření směsi v kanálu).

5.4 Měření č. 1

Při prvním měření byl endoskop instalován do vložky ve stěně sacího kanálu v hlavě válců. Úhel pohledu endoskopu byl 70° a pohled byl nasměrován na sací ventily. Kamera byla upevněna pomocí stativu a k endoskopu byla připojena přímo, bez kloubového vedení. Intenzita osvětlení pomocí zábleskového zdroje byla 100%.



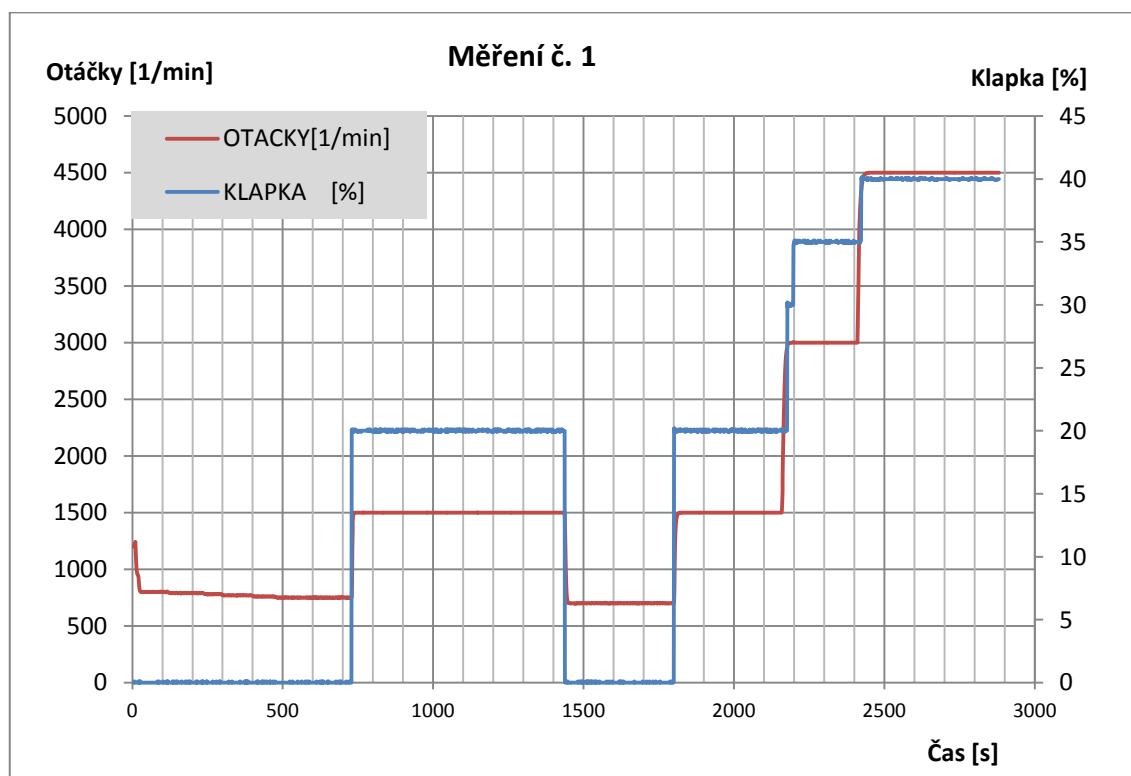
Obrázek 29: Umístění endoskopu při měření č. 1, 2 a 3

V první fázi měření, po nastartování studeného motoru nebylo možné provést záznam, protože po startu se na studených stěnách kanálu usazovalo palivo. Stejně tak na čočce endoskopu, proto byl obraz neostrý, zamlžený a pro vyhodnocení nepoužitelný. Proto se přistoupilo k částečnému zahřátí motoru, nejdříve běh na volnoběžné otáčky po dobu asi 12 minut a posléze dalších 12 minut při 1500 otáčkách za minutu při otevření škrticí klapky na 40%. Po částečném zahřátí motoru se již palivo

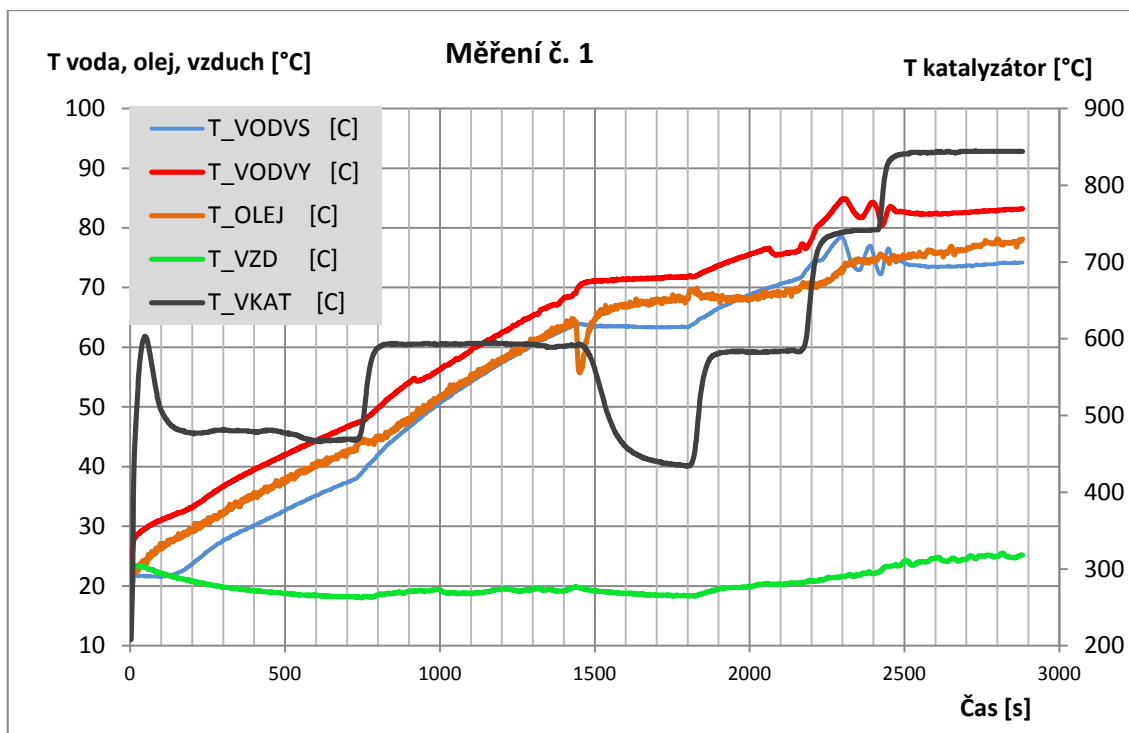
na čočce endoskopu neusazovalo a mohlo se přistoupit k záznamu. První měření tedy probíhalo při ohřívání částečně zahřátého motoru (teplota oleje na počátku měření byla cca 60°C).

čas	otáčky	klapka	moment	t olej	t voda-výstup
[h:m:s]	[min ⁻¹]	[%]	[Nm]	[°C]	[°C]
počátek	průměr			počátek	
konec				konec	
ohřev motoru					
000:00:00	779,3	0,0	1,8	22,4	24,9
000:12:22				42,9	47,3
000:12:54	1500,0	20,0	22,6	44,3	48,0
000:24:23				64,3	69,0
měření při ohřevu					
000:24:55	700,1	0,0	2,0	59,2	70,9
000:30:30				68,4	71,8
000:31:02	1500,0	20,0	22,8	69,3	72,0
000:36:33				69,8	76,1
000:37:04	3000,0	34,8	45,1	70,8	77,3
000:40:47				74,6	83,4
000:41:19	4499,8	40,0	48,4	74,8	82,0
000:48:55				78,1	83,2

Tabulka 1: Měření č. 1



Graf 1: Zatížení motoru při měření č. 1



Graf 2: Průběh teplot při měření č. 1

Ze záznamů získaných prvním měřením, kdy je záběr endoskopu nasměrován na ventily, je patrné, jak probíhá odpařování směsi v sacím kanálu po vstřiku. Z těchto záznamů jsou dobře viditelné sací ventily, takže je zde vidět i chování směsi při otevírání sacích ventilů a při nasávání směsi do válce motoru.



Obrázek 30: Snímek ze začátku vstřiku – částečně zahřátý motor na volnoběh

Ze záznamů je vidět, jak se vstříknuté palivo kumuluje ve spodní části sacího kanálu v prostoru hlav sacích ventilů. Palivo se odtud odpařuje do prostoru kanálu a při otevírání ventilů se zde neodpařené palivo již téměř nenachází.



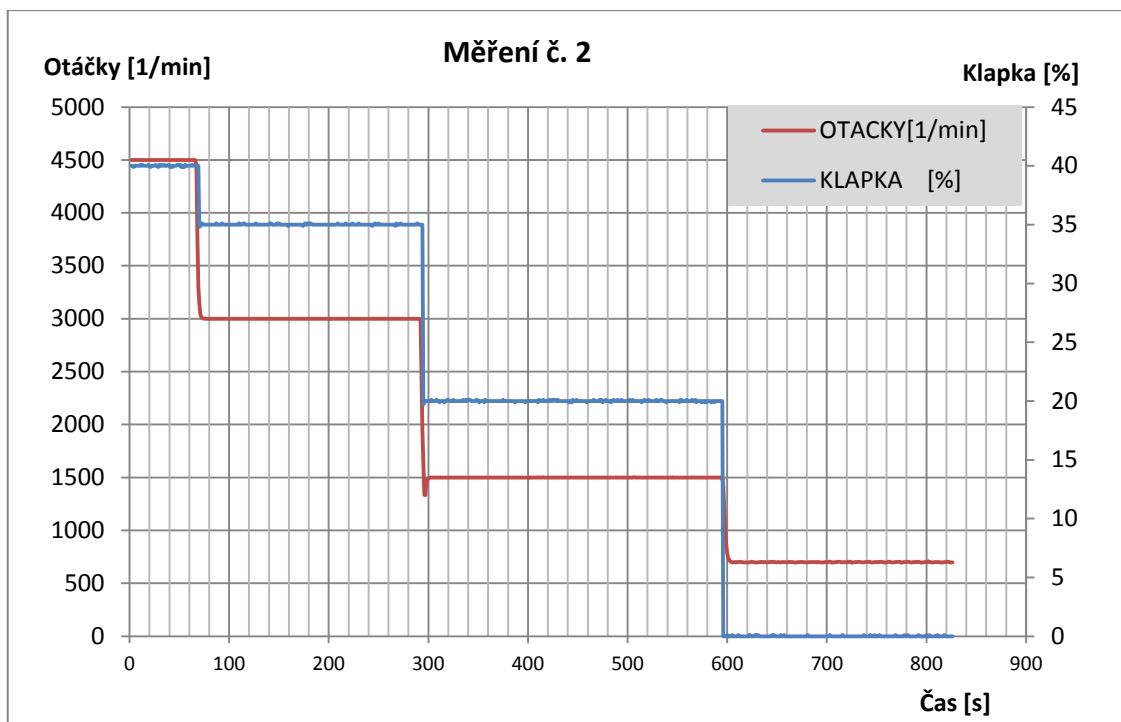
Obrázek 31: Kumulace paliva v prostoru hlav ventilů

5.5 Měření č. 2

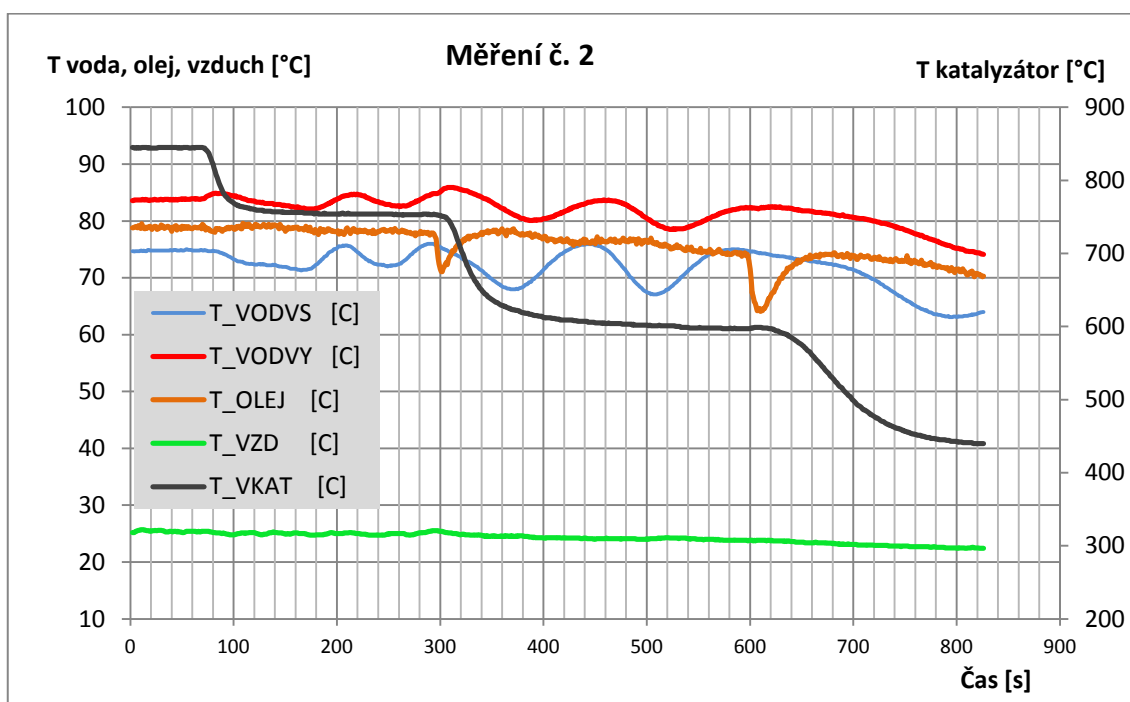
Druhé měření probíhalo s naprosto totožným sestavením kamery a endoskopu, jako první měření. Jediným rozdílem bylo, že motor už byl zahřátý na provozní teplotu. Vzhledem k tomu, že motor byl zahřátý, neuvádím v dalších tabulkách teploty na začátku a na konci intervalu, ale průměrnou hodnotu.

čas	otáčky	klapka	moment	t _{olej}	t _{voda výstup}
[h:m:s]	[min ⁻¹]	[%]	[Nm]	[°C]	[°C]
počátek	průměr				
konec					
000:00:00	4499,8	40,0	49,0	78,9	83,8
000:01:03					
000:01:34	2999,9	35,0	54,1	78,4	83,3
000:04:51					
000:05:22	1499,9	20,0	30,1	76,3	81,6
000:09:58					
000:10:29	700,0	0,0	2,4	72,6	79,0
000:13:51					

Tabulka 2: Měření č. 2



Graf 3: Zatížení motoru při měření č. 2



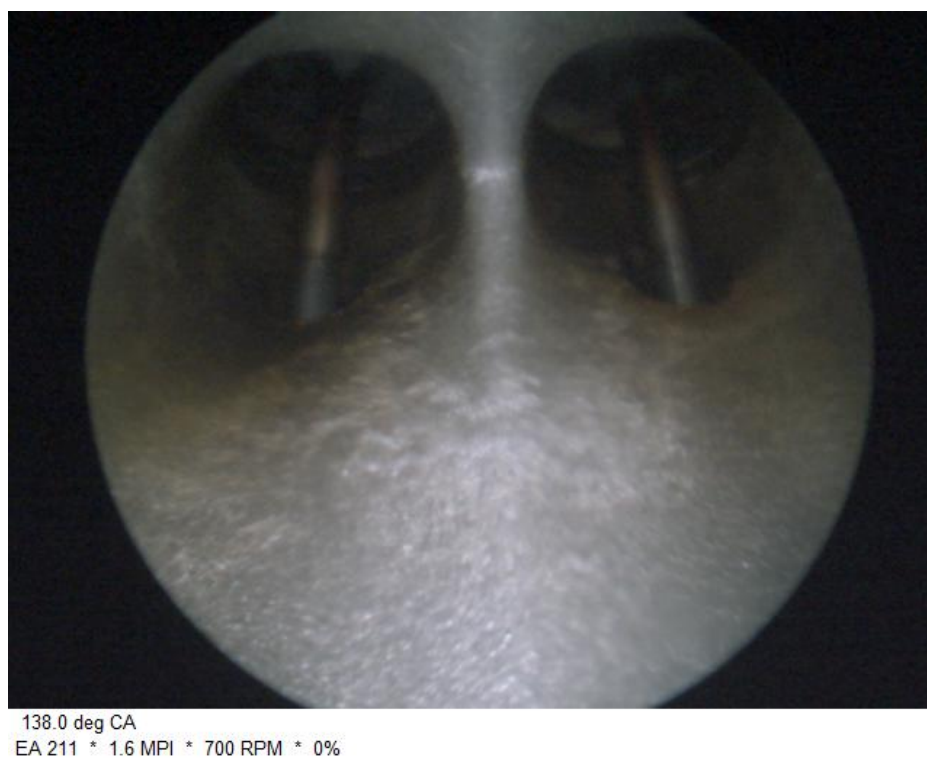
Graf 4: Průběh teplot při měření č. 2

První a druhé měření se provádělo se stejným záznamem a lišilo se pouze provozní teplotou motoru. Důvodem bylo to, že jsem chtěl porovnat záznamy měření na studeném a teplém motoru. Bohužel se nepodařilo získat záznam ihned po startu motoru, ale až po částečném zahřátí, takže srovnáním výsledků z prvního a druhého měření nelze vyvodit prokazatelné závěry svědčící o smáčení stěny kanálu palivem.

Pro porovnání zde uvádím snímky zaznamenané při volnoběžných otáčkách z prvního a druhého měření, protože při těchto měřeních byl největší rozdíl teploty motoru (teplota oleje byla v druhém případě o cca 15°C vyšší). Snímky jsou z okamžiku, kdy jsou otevřené sací ventily.



Obrázek 32: Otevřené sací ventily – volnoběh při zahřívání



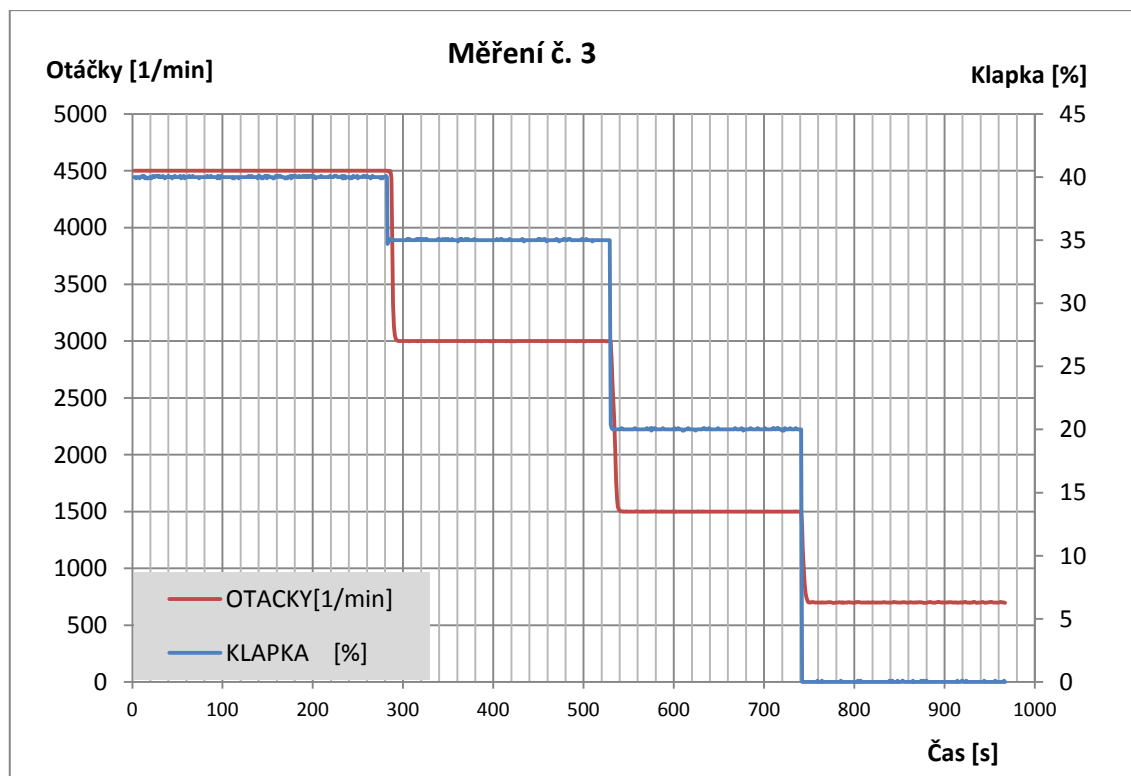
Obrázek 33: Otevřené sací ventily – volnoběh po zahřátí

5.6 Měření č. 3

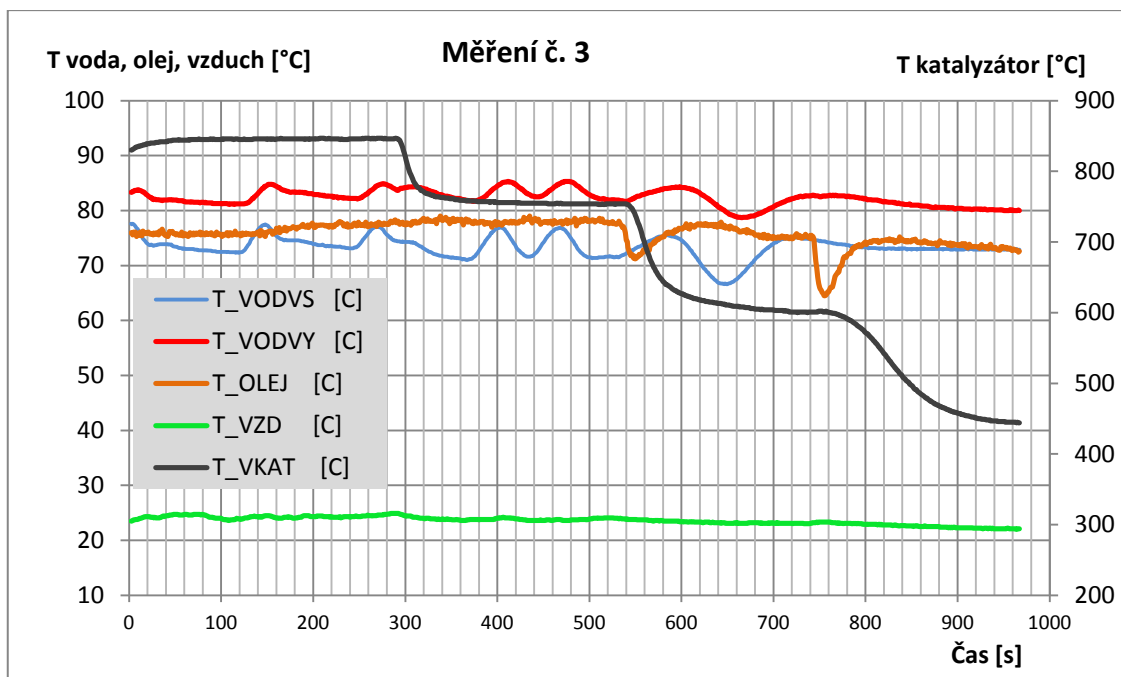
Při třetím měření se endoskop ve vložce ve stěně sacího kanálu v hlavě vyměnil za endoskop s úhlem pohledu 30°. Ten byl oproti předchozím měřením otočen tak, že v jeho zorném poli byl vstřikovací ventil. Intenzita osvětlení pomocí zábleskového zdroje byla snížena na 90%, aby nebyl záznam příliš přesvícen. Ze záznamů získaných z tohoto měření je dobře vidět tvar vstřikovaného paprsku paliva a jeho rozpad.

čas	otáčky	klapka	moment	t olej	t voda výstup
[h:m:s]	[min ⁻¹]	[%]	[Nm]	[°C]	[°C]
počátek	průměr				
konec					
000:00:00	4499,8	40,0	49,2	76,4	82,6
000:04:42					
000:05:13	2999,9	35,0	54,7	78,0	83,3
000:08:52					
000:09:23	1499,9	20,0	30,7	75,9	81,8
000:12:26					
000:12:58	699,9	0,0	2,3	73,7	81,0
000:16:14					

Tabulka 3: Měření č. 3

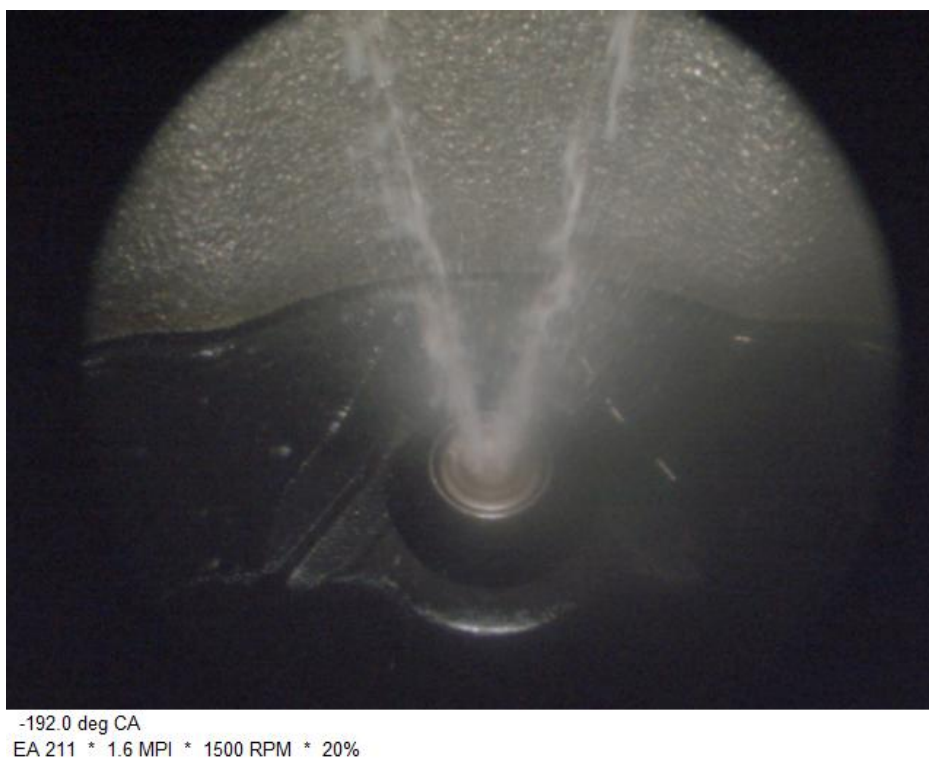


Graf 5: Zatížení motoru při měření č. 3



Graf 6: Průběh teplot při měření č. 3

Ze záznamů získaných třetím měřením lze hodnotit počátek a konec doby vstřiku paliva při různých zatíženích motoru. Pro získání těchto hodnot je ovšem výhodnější použít data naměřená pomocí indikace, kde je počátek a konec vstřiku zaznamenáván. Dále snímky vypovídají o tvaru a směru vstřikovaného paprsku paliva. Ze záznamů je vidět, jak je vstřikovací tryskou směřován výstřik paliva do dvou kanálů.

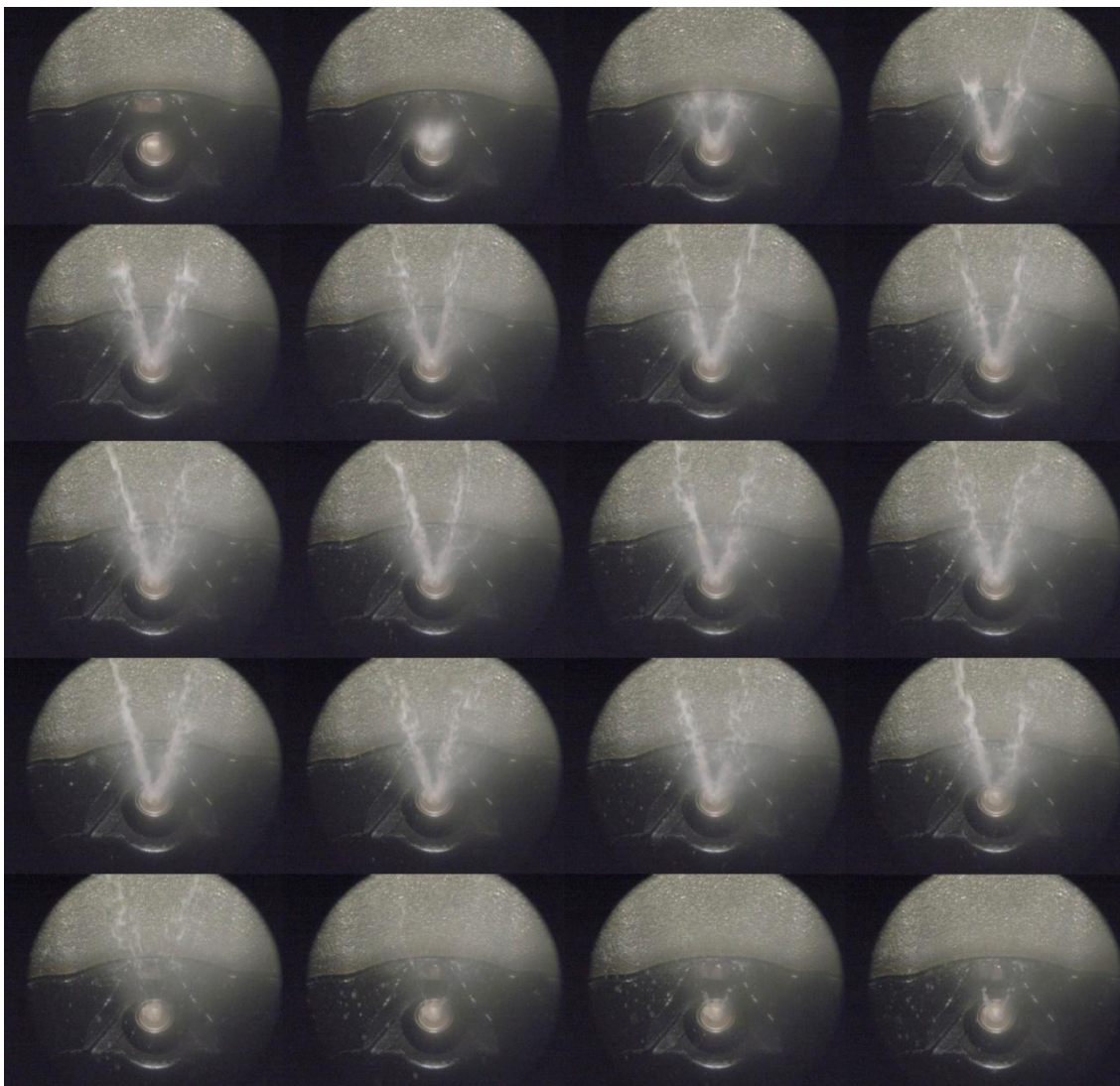


Obrázek 34: Paprsky vstřikovaného paliva směřované ke kanálům jednotlivých ventilů

Dále je vidět, jak se liší tvar vstřikovaného paprsku podle zatížení motoru. Při volnoběhu má vstřík spíše charakter mlhy a paprsek je více rozptýlen. Naopak při vyšším zatížení je vstřík více soustředěn do paprsků. To je nejspíše způsobeno tím, že pro dodání malého množství paliva vstřikovaného při volnoběhu je doba otevření vstřikovacího ventilu velmi krátká. Tak dojde k lepšímu rozprášení paliva, než při vstřiku většího množství, který trvá delší dobu.

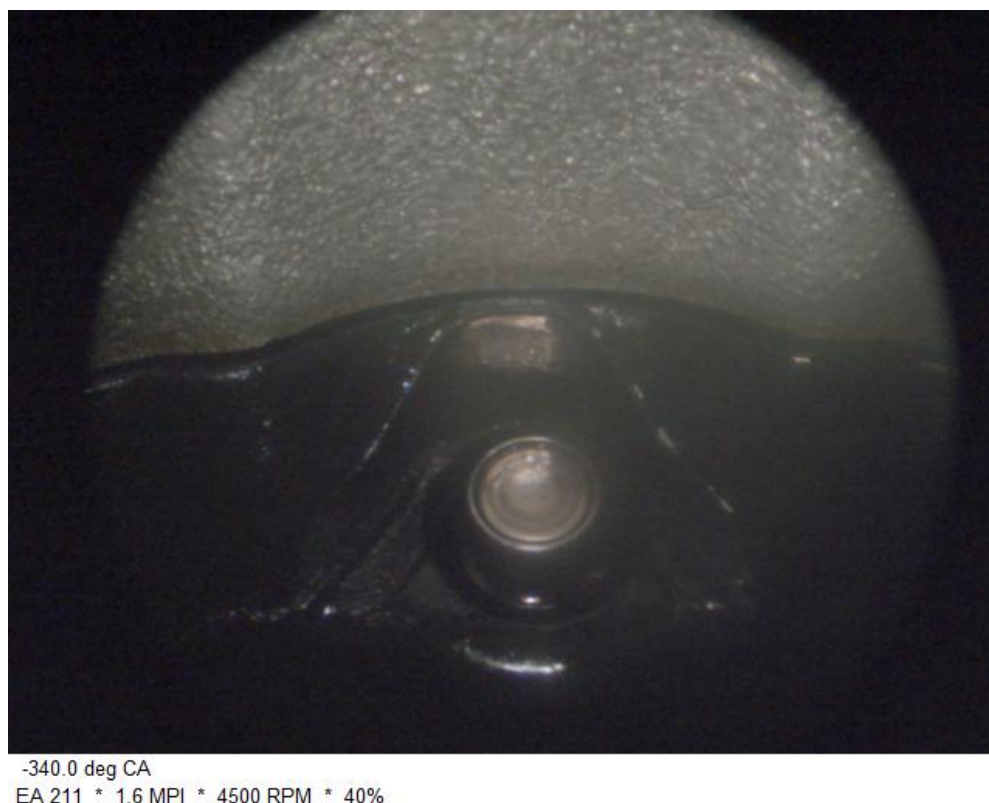


Obrázek 35: Průběh počátku vstřiku paliva při volnoběhu od -148° do -144° natočení KH



Obrázek 36: Průběh vstřiku paliva při 1500 ot./min od -204° do -166° natočení KH

Na snímcích vstřikovacího ventilu bylo dále možno v jeho okolí na hladkém a lesklém povrchu plastového sacího potrubí sledovat usazování paliva. Tyto odlesky byly lépe patrné při porovnání více po sobě jdoucích snímků nebo z videa. Na matném a hrubším povrchu kanálu v hlavě se podobný efekt nedal vysledovat. To, že se palivo nacházelo na plastovém sacím potrubí, může být způsobeno tím, že se jedná o bezprostřední okolí ústí vstřikovací trysky. Dalším faktorem je zajisté i teplota tohoto dílu a jeho tepelné vlastnosti.

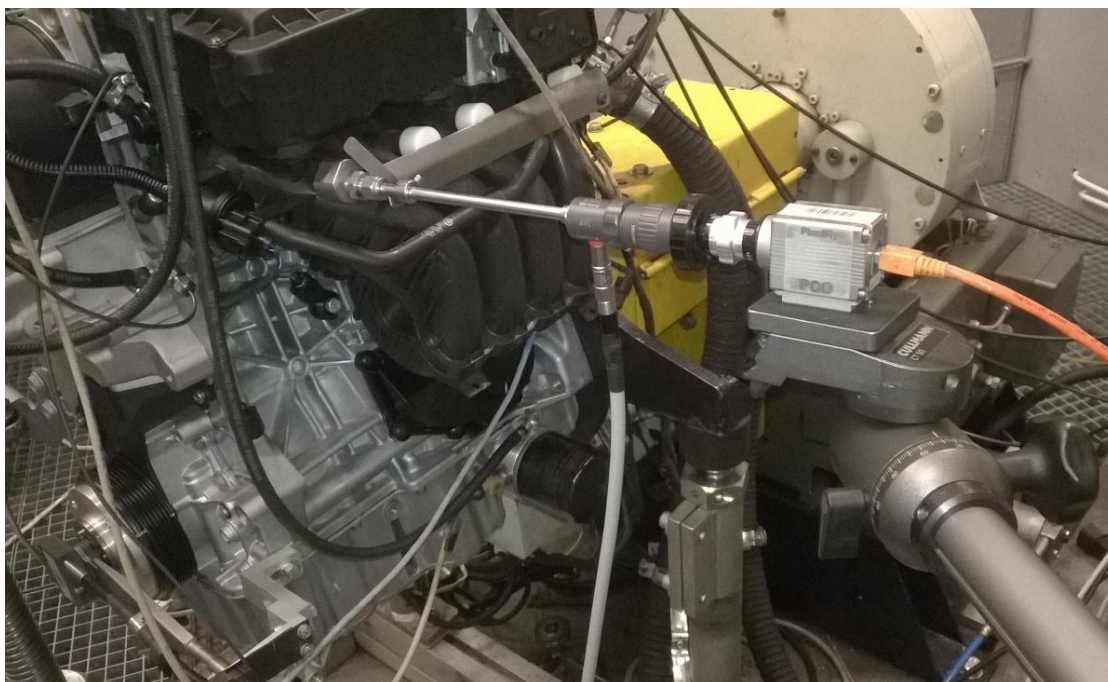


Obrázek 37: Odlesky od palivem smáčené stěny v okolí vstřikovací trysky

Tento poznatek by se dal využít pro další výzkum smáčení stěn. Kdyby se například stěna kanálu v hlavě vhodně upravila, mohl by na ní usazený film paliva být na snímcích zřetelný. Úprava by ovšem nesměla příliš ovlivnit rychlost odpařování paliva z povrchu, takže by se nedalo použít například nalepení lesklé plastové pásky, na které by podobně jako na plastovém sání mohl být film paliva vidět, protože by měla zároveň funkci tepelně-izolační vrstvy. Dalšími možnostmi by mohlo být například vyleštění plochy kanálu či nástřik vhodnou barvou. I tyto úpravy by ovšem mohly do určité míry ovlivnit rychlost odpařování paliva ze stěny.

5.7 Měření č. 4

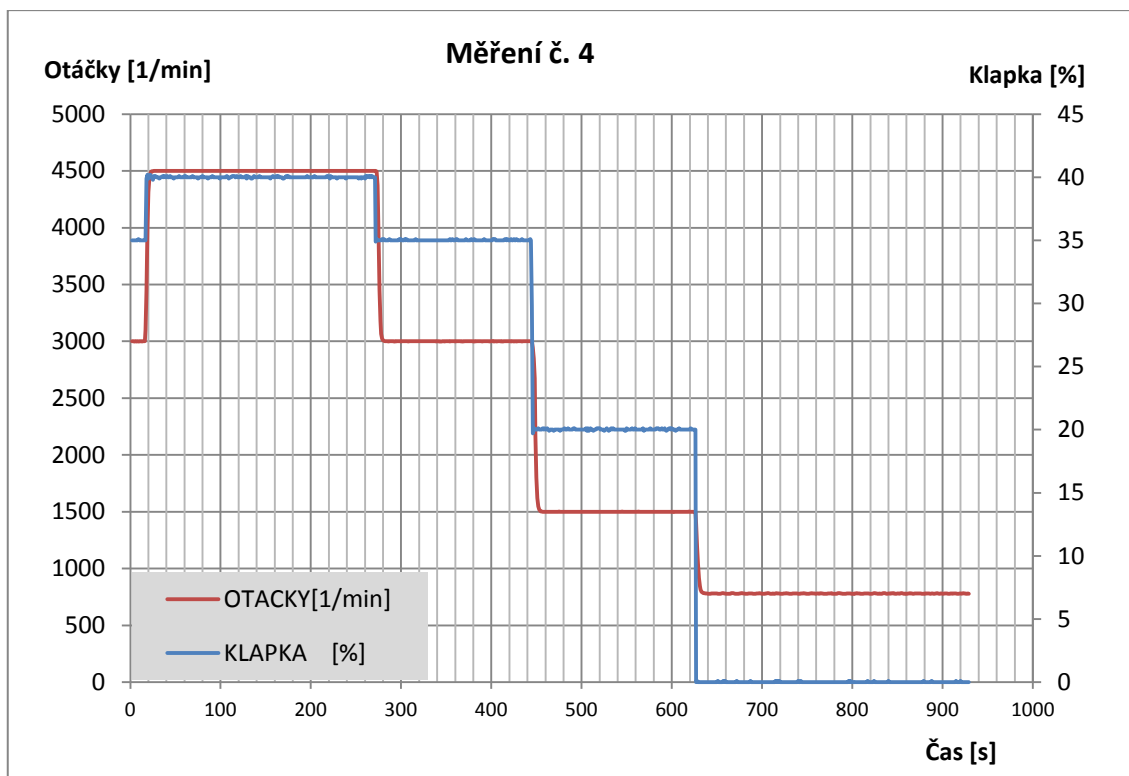
Po třetím měření se vyjmul endoskop z vložky ve stěně sacího kanálu a otvor byl utěsněn zátkou. Pro čtvrté měření byl endoskop umístěn v plastovém sacím potrubí. Do pouzdra po ventilu na CNG se umístila vložka a do ní se ustavila sonda endoskopu s úhlem pohledu 30°. Pootáčením vložky se dosáhlo umístění čočky endoskopu přibližně v ose sacího kanálu. Hloubka zasunutí sondy byla volena tak, aby byly co nejlépe vidět sací ventily, ale aby endoskop nezasahoval do proudu vstřikovaného paliva. Kamera byla upevněna pomocí stativu a k endoskopu byla připojena přímo, bez použití kloubového vedení. Intenzita osvětlení pomocí zábleskového zdroje byla 100%.



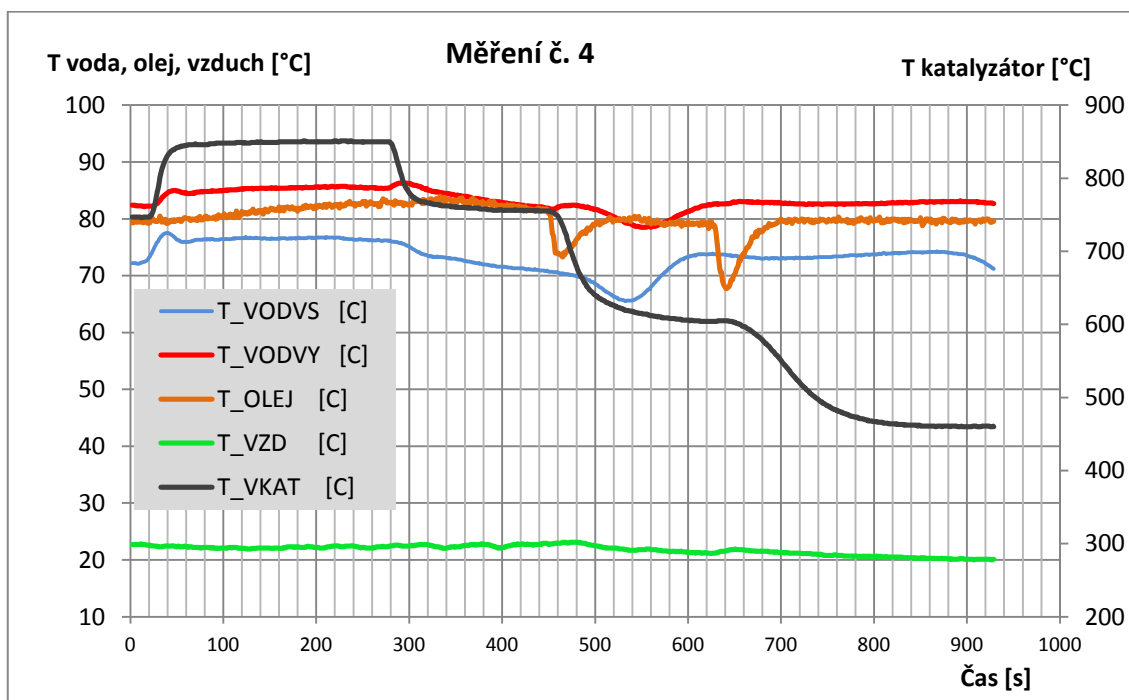
Obrázek 38: Umístění endoskopu při měření č. 4

čas	otáčky	klapka	moment	t olej	t voda výstup
[h:m:s]	[min ⁻¹]	[%]	[Nm]	[°C]	[°C]
počátek	průměr				
konec					
000:00:30	4499,8	40,0	47,8	81,3	85,2
000:04:31					
000:05:02	2999,9	35,0	54,2	82,7	83,7
000:07:26					
000:07:57	1500,0	20,0	30,6	79,1	80,6
000:10:30					
000:11:01	779,9	0,0	2,3	79,3	82,8
000:15:36					

Tabulka 4: Měření č. 4

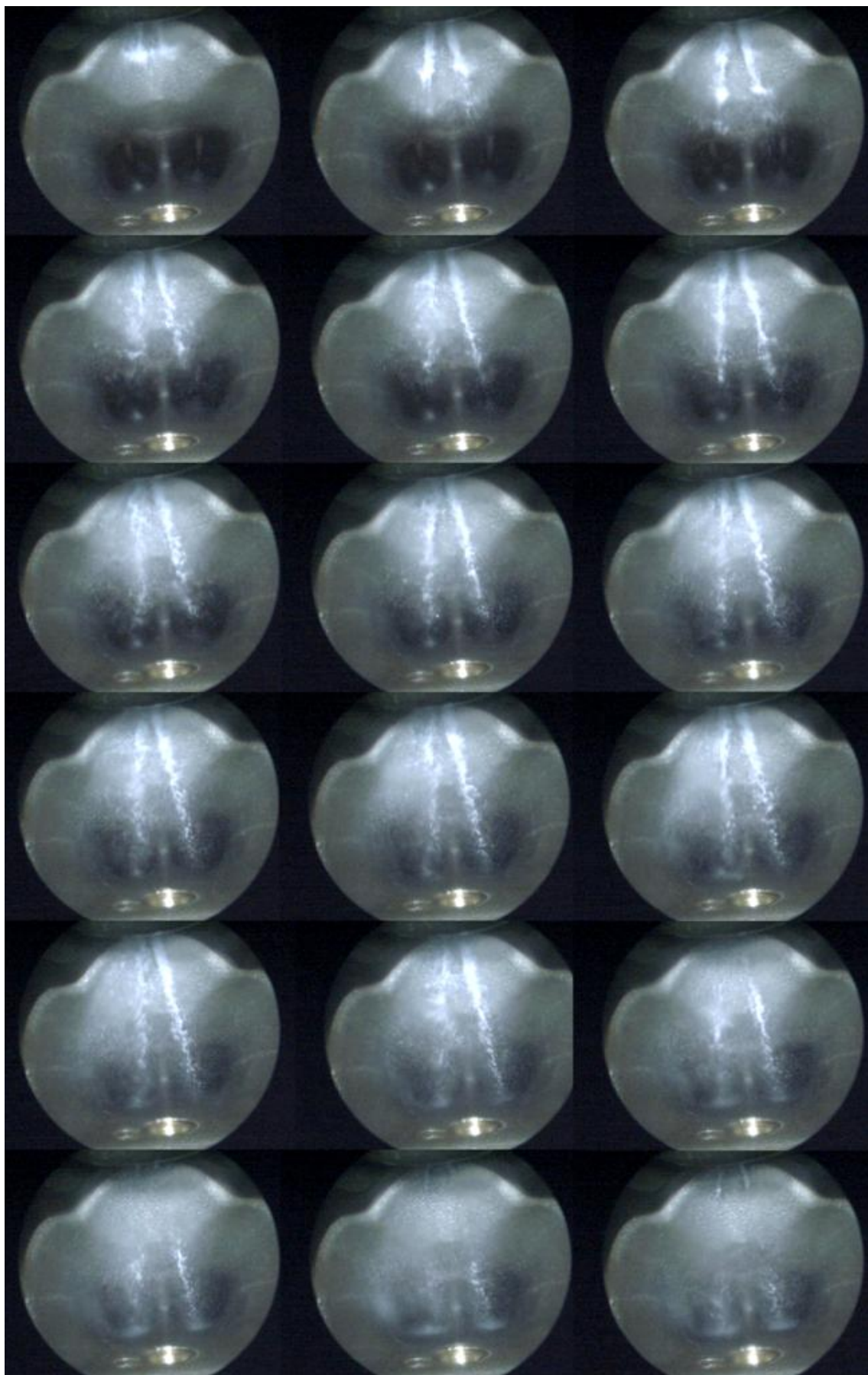


Graf 7: Zatížení motoru při měření č. 4



Graf 8: Průběh teplot při měření č. 4

Čtvrté měření dává celkový obraz děje v sacím kanálu po vstřiku, je zde vidět téměř celý paprsek vstřikovaného paliva od vstřikovače a zároveň jsou na pohledu patrné i sací ventily, takže je vidět víření paliva po vstříknutí do kanálu.



Obrázek 39: Průběh vstříku paliva při 1500 ot./min od -200° do -166° natočení KH

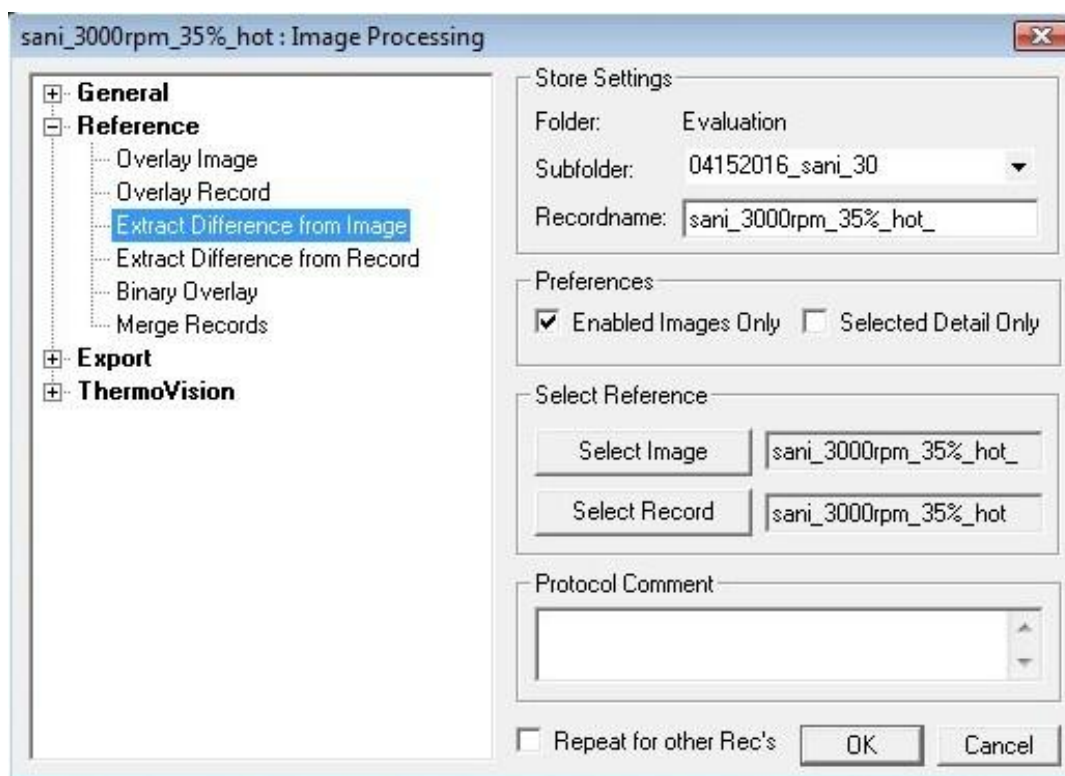
6 Vyhodnocení záznamů

Hodnocení a závěry v předcházející kapitole vycházely z pozorování obrazových záznamů a jejich vzájemného porovnávání. Tímto postupem ovšem není možné získat žádné porovnatelné či jinak exaktně měřitelné výstupy. Jedním z cílů této práce je navrhnout systematickou metodu pro vyhodnocení kvality tvorby směsi z naměřených vizualizací.

6.1 Postprocessing

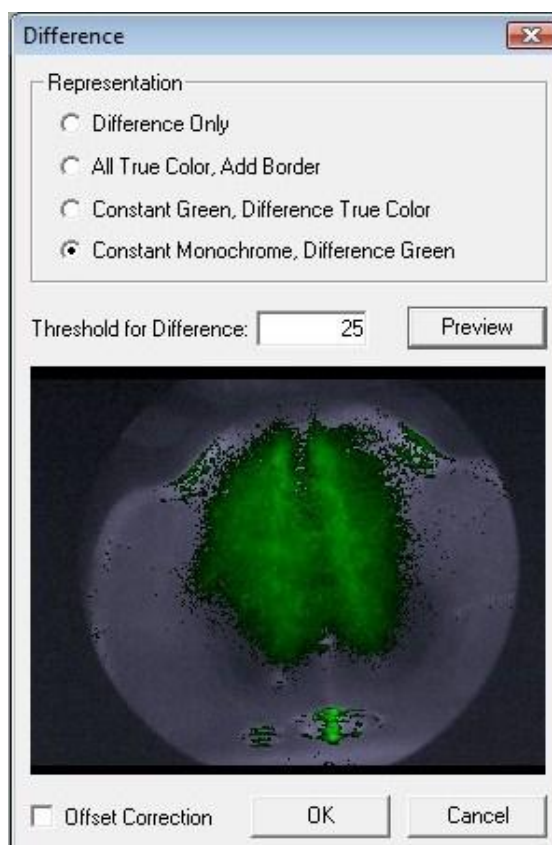
Další možností vyhodnocení zaznamenaných dat nabízí i program AVL VisioCSope. Jedná se o postprocessing zaznamenaných dat, konkrétně pomocí funkce *Difference*. Princip spočívá v tom, že se zvolí a uloží referenční snímek pro každý záznam a následně jsou na následujících snímcích zvýrazněny změny oproti referenčnímu snímku. Zobrazení diferencí poskytuje obrazy vhodné pro hodnocení množství neodpařeného paliva nacházejícího se na snímku. Z takto upravených záznamů jsem opět provedl export obrázků a videí.

Pro vytvoření záznamu diferencí je potřeba vybrat referenční snímek a záznam, pro který chceme difference zobrazit.

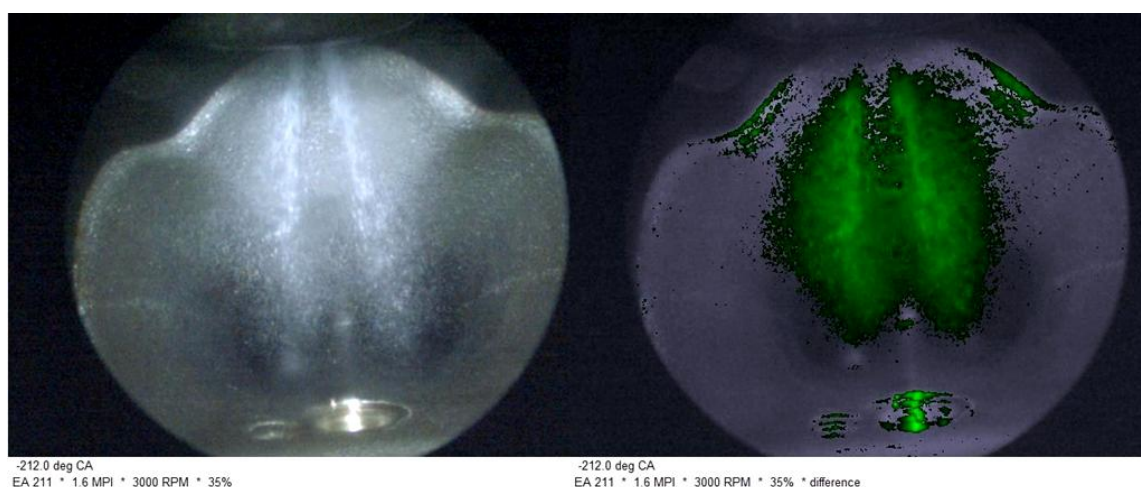


Obrázek 40: Okno výběru pro funkci *Difference*

Dále je možné si zvolit ze čtyř typů zobrazení referencí. Pro hodnocení množství vstříknutého a následně neodpařeného paliva považuji za nejvýhodnější možnost, kdy neměnné oblasti zůstávají původní barvou a difference se zobrazí zeleně. Dalším vstupem pro tuto funkci je zadání hodnoty *Threshold*, což je práh zvýraznění, pomocí něhož můžeme ovlivnit velikost zvýrazněné oblasti. Pro vyhodnocení jsem použil hodnotu 25, která podle porovnání s neupraveným obrazem podle mě nejlépe odpovídala velikosti oblaku vstříknutého paliva.



Obrázek 41: Nastavení funkce Difference

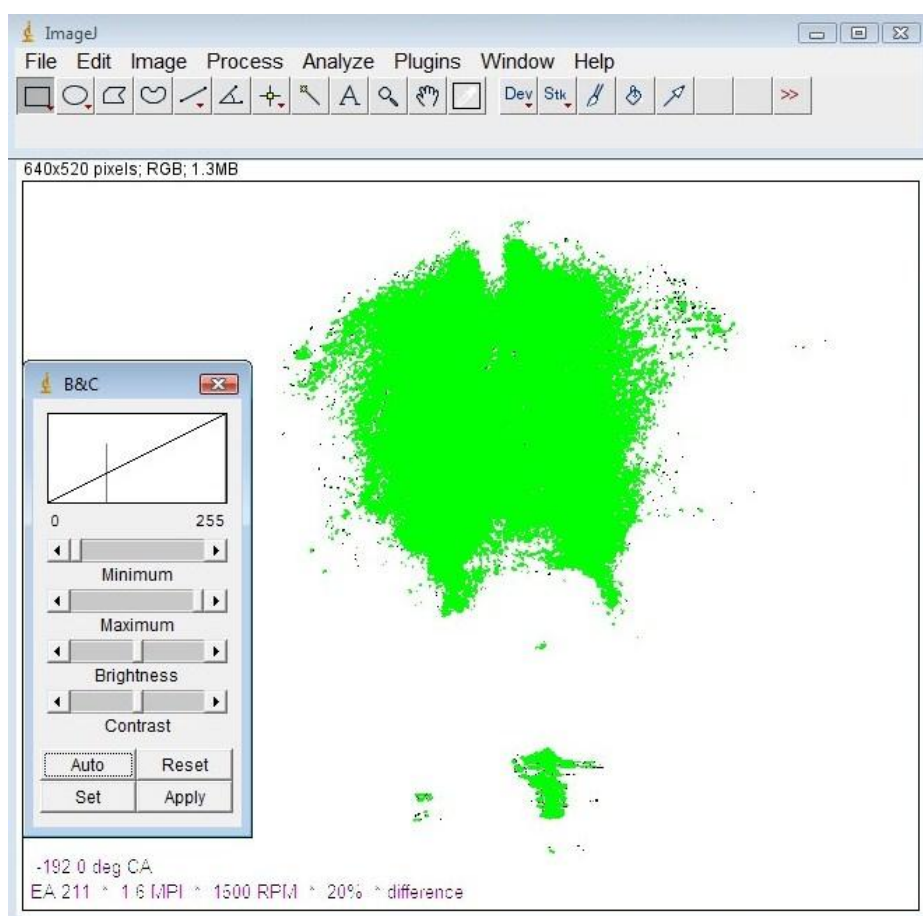


Obrázek 42: Porovnání neupraveného snímku a snímku se zobrazením difference

6.2 Kvantifikace neodpařeného paliva na snímcích

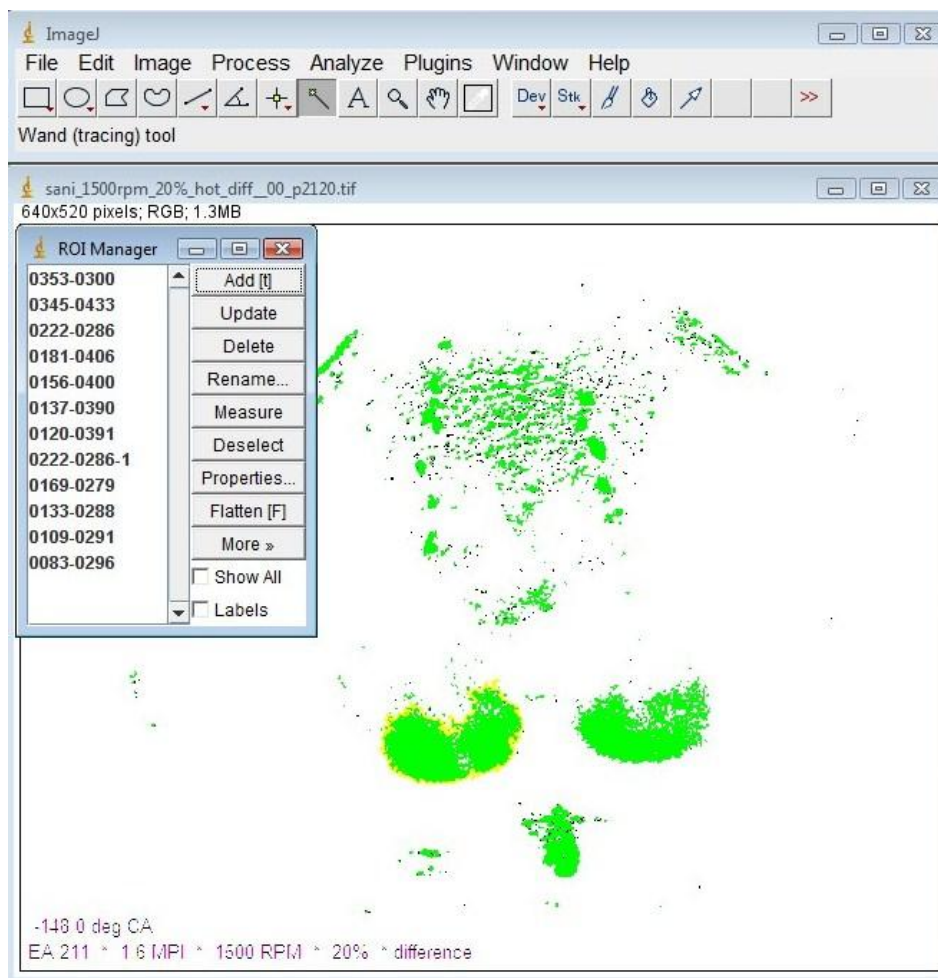
Ze získaných obrazových výstupů se zobrazením difference můžeme množství vstříknutého a neodpařeného paliva nacházejícího se na jednotlivých snímcích lépe odhadnout, ale k měřitelnému porovnání je třeba se snímky dále pracovat. Jednou z možných metod vyhodnocení je určit velikost plochy zvýrazněné difference. Plocha difference je úměrná množství kapalného paliva ve snímaném prostoru. Protože je kanál trojrozměrný útvar, dochází při vyhodnocování plochy difference ze snímků k nepřesnosti – zkreslení perspektivou pohledu. Pokud však porovnáváme snímky z jednoho měření, je zkreslení stejné, tudíž by toto vyhodnocení mohlo být jedním z přístupů, jak posoudit tvorbu směsi v sacím kanálu.

Pro zjištění velikosti plochy zeleně zvýrazněné difference na snímcích jsem použil volně dostupný software ImageJ [21]. Jedná se o volně šiřitelnou aplikaci pro práci s bitmapovou grafikou. Jednotlivé načtené snímky jsem upravil pro lepší rozlišení hranice plochy difference. Úprava byla provedena pomocí funkce *Brightness/Contrast* (*Image – Adjust – Brightness/Contrast*).



Obrázek 43: Snímek vstříku paliva po zvýraznění difference programem ImageJ

Dalším krokem bylo změření velikosti plochy difference. K tomuto jsem použil funkci *ROI Manager* (*Analyze – Tools – ROI Manager*). Pomocí nástroje *Wand tool* z panelu nástrojů se vyberou všechny plochy na obrazu, které chceme zahrnout do měření. Po výběru jednotlivých ploch je přidáme do měření pomocí okna *ROI Manageru* a jeho funkce *Add it*. Když máme vybrány všechny měřené plochy, pomocí funkce *Measure* se nám zobrazí výsledky měření. Tyto hodnoty lze jednoduše exportovat do Excelu, což je výhodné pro další úpravu dat a tvorbu grafů.



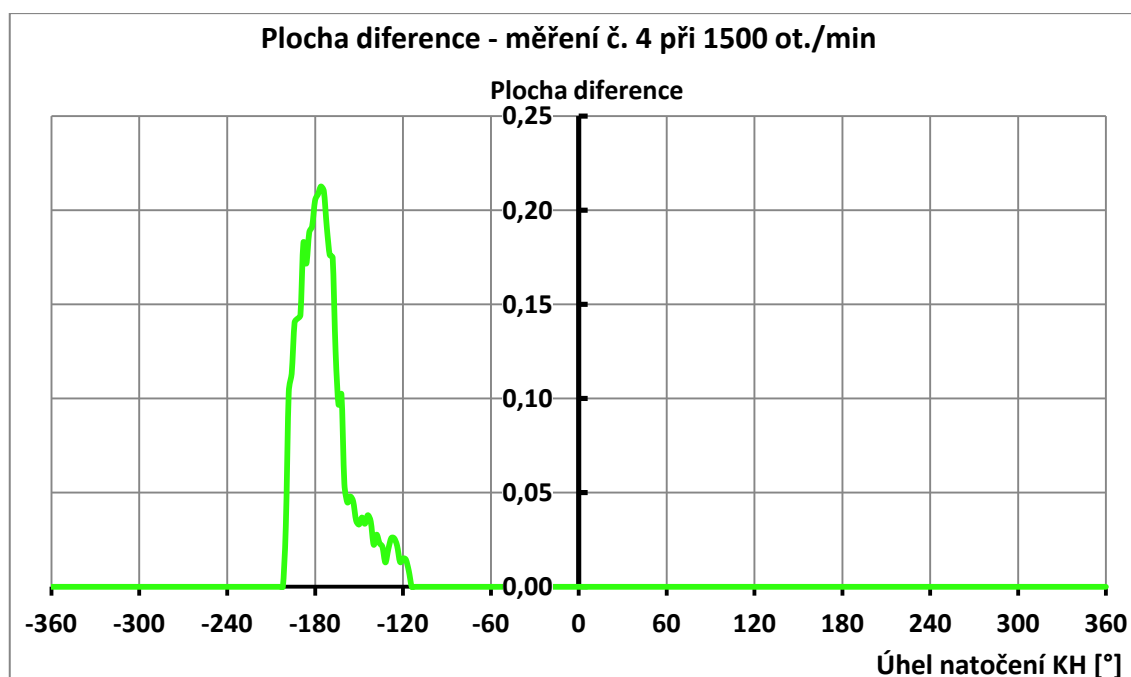
Obrázek 44: Měření ploch pomocí programu ImageJ

Naměřené hodnoty z tohoto měření jsou velikosti plochy v pixelech. S těmito daty jsem dále pracoval tak, že jsem vyjádřil velikost plochy difference jako část z celku, přičemž jako celek byl brán celý obraz z kamery (rozlišení 640x480 pixelů). To znamená, že kdyby byla difference přes celou plochu, byla by její hodnota právě jedna. Pro takto přepočtené poměrné velikosti diferencí pro jednotlivé úhly pootočení klikové hřídele jsem sestavil graf. Z grafu je zřejmé, jak při vstřiku paliva difference roste, až dosáhne vrcholu. Dále je již znatelný pokles velikosti diferencí, což značí odpařování

paliva v kanálu. Hodnoty takto vypočtené poměrné velikosti difference se mohou mezi sebou porovnávat s měřeními získanými při stejném umístění endoskopu, při změně zatížení a otáček.

natočení KH [°]	-204	-202	-200	-198	-196	-194	-192	-190	-188	-186
plocha dif. [px]	0	0	9838	31725	34749	43120	43762	44370	56076	52743
poměr difference	0,000	0,000	0,032	0,103	0,113	0,140	0,142	0,144	0,183	0,172
natočení KH [°]	-182	-184	-180	-178	-176	-174	-172	-170	-168	-166
plocha dif. [px]	58849	57812	63073	64063	65341	64549	58680	54130	53706	38321
poměr difference	0,192	0,188	0,205	0,209	0,213	0,210	0,191	0,176	0,175	0,125
natočení KH [°]	-164	-162	-160	-158	-156	-154	-152	-150	-148	-146
plocha dif. [px]	29745	31386	16782	13788	14756	13947	10831	10159	11314	10283
poměr difference	0,097	0,102	0,055	0,045	0,048	0,045	0,035	0,033	0,037	0,033
natočení KH [°]	-144	-142	-140	-138	-136	-134	-132	-130	-128	-126
plocha dif. [px]	11688	10662	6880	8520	7118	6512	3976	6157	7944	7915
poměr difference	0,038	0,035	0,022	0,028	0,023	0,021	0,013	0,020	0,026	0,026
natočení KH [°]	-124	-122	-120	-118	-116	-114	-112			
plocha dif. [px]	6715	4061	4642	4437	2583	0	0			
poměr difference	0,022	0,013	0,015	0,014	0,008	0,000	0,000			

Tabulka 5: Změřené velikosti plochy diferencí pro záznam z měření č. 4 při 1500 ot./min



Graf 9: Velikost plochy diferencí pro měření, kdy byl endoskop zabudován v sacím potrubí

Tato navržená metoda by mohla být jedním z přístupů, jak ze získaných vizualizací dostat měřitelná a porovnatelná data. Další cestou, jak by se dala tato metoda zlepšit, by bylo použití specializovanějšího softwaru, který by umožnil hromadné měření všech snímků, protože měření jednotlivých snímků je velmi zdlouhavé.

7 Závěr

Cílem této práce je seznámit čtenáře s možnostmi výzkumu vstřikování paliva do sacího potrubí zážehového motoru pomocí endoskopické techniky. Pro úvod do problematiky jsou v rešeršní části zmíněny způsoby tvorby palivové směsi v zážehových motorech od historicky používaných zařízení až po dnešní moderní systémy vstřikování paliva.

Stěžejní částí práce byla realizace vlastního měření na motoru v laboratořích Technické univerzity v Liberci. Tomuto měření předcházelo zvážení možností přístupu do sacího potrubí pro endoskop. Prvotní návrhy byly rozpracovány pomocí 3D modelu, díky kterému jsem získal i přibližné obrazy, které byly v zorném poli endoskopu. Pomocí 3D modelování jsem navrhl i vložky pro uložení sondy endoskopu tak, aby se získaly co možná nejlepší záznamy s ohledem na zástavbové poměry motoru. Následně se přistoupilo k sestavení měřicího zařízení a po několika pokusných měřeních byla realizována měření, jejichž výsledky jsou v této práci prezentovány.

Výsledky záznamů z vizualizace jsem zpracoval a provedl export obrazových záznamů. Vzhledem k velkému objemu obrazových dat je v této zprávě prezentována pouze část. Další vytvořené snímky z vizualizace jsou uloženy na přiloženém datovém nosiči. Snímky nám dávají představu o dějích v sacím potrubí při vstřikování paliva a následné tvorbě směsi. Tyto záznamy jsem dále zpracoval tak, aby bylo možné přistoupit k vytvoření metodiky pro jejich vyhodnocení. Navrhl jsem metodu, jak by bylo možné vyhodnotit získaná data, a popsal jsem její postup. V návrhu této metody zmiňuji i návod na vyhodnocení pomocí konkrétního programu pro práci s grafikou. Následně je prezentován příklad zpracování dat z jednoho měření. Jednotlivé zpracované snímky ze zmiňovaného měření, jsou vzhledem ke svému množství umístěny opět na datovém nosiči.

Navržená metoda pro vyhodnocení snímků z vizualizace je použitelná, avšak její nevýhodou je velká časová náročnost. Jednou z cest ke komfortnějšímu zpracování takovýchto měření by mohlo být použití software, který by vycházel z navržené metody a umožnil by hromadnou úpravu celého rozsahu snímků.

8 Seznam použité literatury

- [1] Scholz Celestýn a Blažek Josef: Vizualizace procesu spalování a vstřikování paliva. FS TUL, ISBN 80-8069-051-0
- [2] Blažek Josef: Vizualizace dějů uvnitř spalovacího motoru. [online] Dostupné z: http://intech2.tul.cz/dokumenty/vystupy_z_projektu/04~TUL%20-%20KI%C3%AD%C4%8Dov%C3%A1%20aktivita%204/In-TECH2_vizualizace.pdf [vid. 18. 3. 2016]
- [3] Scholz Celestýn a Blažek Josef: Úprava motoru Š-A pro vizualizaci vstřikování. FS TUL 2002, Č. zprávy: SM: 431/2002
- [4] Hromádko Jan, Hromádko Jiří, Hönig Vladimír, Miler Petr: Spalovací motory. Grada Publishing 2011, ISBN 978-80-2473-475-0
- [5] Beroun Stanislav: Vozidlové motory, FS TUL [online]. Dostupné z: <http://www.kvm.tul.cz/getFile/id:1985> [vid. 20. 4. 2016]
- [6] Páv Karel: Palivová směs PSM, FS TUL [online]. Dostupné z: <http://www.kvm.tul.cz/getFile/id:2620> [vid. 11. 4. 2016]
- [7] Ferenc Bohumil: Spalovací motory – Karburátory a vstřikování paliva. Computer Press 2004, ISBN 80-251-0207-6
- [8] Pekárek Stanislav: Technologie oprav 1, Střední škola technická a zemědělská Nový Jičín [online]. Dostupné z: <https://publi.cz/books/160/Cover.html> [vid. 14. 5. 2016]
- [9] Benzinové systémy, příručka od firmy Bosch [online]. Dostupné z: http://www.autodarebnik.cz/pdf/Bosch_broz++Benzin_nahl.pdf [vid. 1. 5. 2016]
- [10] Mono-Jetronic [online]. Dostupné z: http://mechmes.websnadno.cz/dokumenty/pri-teo-202_24_karburatory_mono-jetronic.pdf [vid. 5. 5. 2016]
- [11] Gescheidle Rolf a kol.: Příručka pro automechanika. Sobotáles 2001. ISBN 80-85920-76-X
- [12] Systém řízení motoru Motornic, technická příručka Bosch. Robert Bosch GmbH, české vydání 1999. ISBN 80-902585-3-0
- [13] Vlk František: Přímé vstřikování benzínu, VUT Brno [online]. Dostupné z: <http://www.sinz.cz/archiv/docs/si-2004-01-67-71.pdf> [vid. 15. 5. 2016]
- [14] Palivový systém motorů FSI, Samostudijní program 334, [online] Dostupné z: http://www.volkswagenclub.net/manual_download.php?id=145 [vid. 18. 5. 2016]

- [15] Zážehové motory FSI, Dílenská učební pomůcka Škoda Auto [online].
Dostupné z: <http://www.skolahostivar.cz/DownloadPF/55.pdf> [vid. 3. 3. 2016]
- [16] Combustion Homogeneity with PPC in a LD Optical Engine, Lund University Sweden [online]. Dostupné z: <http://lup.lub.lu.se/luur/download?func=downloadFile&recordId=7447360&fileId=7447735> [vid. 15. 5. 2016]
- [17] Research (injector): Setting up the transparent engine and the high-speed camera, Robert Bosch GmbH [online]. Dostupné z: http://videoportal.bosch-presse.de/en/clip/_/-/-/Research-injector-Setting-up-the-transparent-engine-and-the-high-speed-camera?category=Research [vid. 15. 5. 2016]
- [18] A Transparent Engine for Flow and Combustion Visualization Studies, [online].
Dostupné z: <http://www.tvu.com/PSCylTEngweb.html> [vid. 15. 5. 2016]
- [19] AVL VISIOSCOPE Product Guide, AVL List GmbH, Graz – Austria
- [20] autor, s využitím 3D modelů částí motoru od Škoda Auto
- [21] ImageJ, open source image processing program. Dostupné z: http://www.stahuj.centrum.cz/grafika_a_design/tvorba_grafiky/bitmapove_editory/imagej/?&g%5Boz%5D=1.48 [vid. 20. 5. 2016]
- [22] Mazda 2, Mazda Motor Logistics Europe [online]. Dostupné z: <http://www.mazda-press.com/services/download.ashx?id=53a0353e11e0bd2974c13306&t=pdf&h=4s4oOf1JonNjCElY3kI%2FrmE%2FROAznN8HhFQTg2U4o5U%3D> [vid. 25. 5. 2016]